



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

EMANUELA BARBOSA SANTOS

COMPORTAMENTO FÍSICO E HÍDRICO DE SOLOS EM INTERAÇÃO COM
CARVÃO VEGETAL

FORTALEZA

2021

EMANUELA BARBOSA SANTOS

COMPORTAMENTO FÍSICO E HÍDRICO DE SOLOS EM INTERAÇÃO COM CARVÃO
VEGETAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior.

FORTALEZA

2021

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)

- S234c Santos, Emanuela Barbosa.
Comportamento físico e hídrico de solos em interação com carvão vegetal / Emanuela Barbosa Santos. –
2021.
87 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior.
1. condicionador de solo. 2. hidroretentores. 3. água no solo. I. Título.

CDD 631.4

EMANUELA BARBOSA SANTOS

COMPORTAMENTO FÍSICO E HÍDRICO DE SOLOS EM INTERAÇÃO COM
CARVÃO VEGETAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em 24/11/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Laércio Duarte Souza
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA- Mandioca e Fruticultura)

Dr^a. Francisca Gleiciane da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Ana Rita Barbosa (*in memoriam*),
a qual devo, dentre outras,
esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por toda força inexplicável que tive durante esse período do doutoramento, mesmo com ocorridos afligidos.

À minha irmã Thamires Barbosa, por todo amor e preocupação e que nunca soltou minha mão; sempre foi o meu maior porto seguro. E a Thiago Sales que, além de cunhado, um grande irmão que sempre se prestou atento e disponível ao que eu precisasse.

Às famílias Barbosa e Santos que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus amigos de infância: Pedro Ivo Melo, Viviane Souza, Alexandre Pinho, Géssica Valente, Verônica Marinho, Gabriela Silveira, Jéssica Cerqueira, Ana Paula Daltro, Adara Valente, Thaís Cruz, Juliana Souza e Patrícia Nascimento que, mesmo à distância por mais de uma década, sempre se mostraram presentes e vibraram junto comigo em todas as etapas de minha vida.

Aos amigos que fiz durante a trajetória acadêmica e permaneceram durante todos esses anos com apoio, carinho e preocupação: Juliana Souza, Raquel da Hora, Danilo Silva, Rafael Guimarães, Judyson Matos, Janderson Lima, Felipe Gomes, Ana Carla Rodrigues, Israel Pinheiro, André Nogueira e Ericka Paloma.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

À CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao professor Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior pela orientação e por todo aprendizado, paciência e dedicação no meu período de doutoramento.

Ao professor Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota pela disponibilidade, ajuda e apoio em todas as etapas do meu curso de doutorado.

A todos do GEFís (Grupo de Estudo em Física do Solo) e aos que convivi no Laboratório de Física do Solo e no DCS, que se mostraram solícitos e prestativos: Alexandre Queiroz, Angélica Lopes, Francisco José da Silva (Franzé), Gleiciane da Silva, Lucas Sousa, Gustavo Henrique, Deyse Maia e Helon Sousa. Um agradecimento especial ao meu amigo Ícaro Vasconcelos, que esteve presente em todas as etapas do meu doutorado, experimento e produção da tese, além de toda amizade além do ambiente acadêmico.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo que contribuíram com seus ensinamentos durante meu curso de doutorado.

Ao Dr. Láercio Duarte Souza pela benevolência ao ceder o material necessário para a execução do experimento da tese.

Ao professor Odair Pastor Ferreira pela permissão de caracterizar o material utilizado no experimento no Laboratório de Materiais Funcionais Avançados (LaMFA) pertencente ao Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.

À professora Arilene Franklin Chaves pela solicitude ao nos receber no Instituto Federal do Ceará e permitir a coleta de solo utilizado no experimento.

Ao professor Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra pela presteza ao contribuir com a tese.

Ao professor Dr. Luciano da Silva Souza que, apesar da orientação ter sido cessada no mestrado, se manteve presente por todos esses anos com a sua prestatividade e zelo.

Às meninas que dividi o lar durante a minha estadia em Fortaleza e que me ensinaram, mesmo despropositalmente, lições que levarei por toda vida: Edivânia Castro, Ana Janaína Rodrigues e Maria da Saúde Ribeiro. Muito obrigada !

À Ana Etz e à toda família RevolFit que foram essenciais nesse período tão difícil de pandemia, no meio do curso de doutorado, mas que me motivaram todos os dias e se mantêm presentes até os dias atuais com carinho e acolhimento. Gratidão!

À Jéssica Medeiros, responsável por conduzir meu processo de autoconhecimento de modo fascinante e que me fez enxergar verdades essenciais sobre mim mesma, as quais fizeram total diferença na minha última fase do doutorado e decisão dos futuros projetos. Serei eternamente grata a você e ao processo.

E por último, a mim mesma que ressignifiquei e ultrapassei limites que desconhecia e não imaginava ser capaz de conseguir. Por toda força, resiliência e persistência durante o período do doutorado.

RESUMO

O uso de condicionadores de solos hidrotentores, como o biocarvão, vem sendo cada vez mais estudado a fim de aumentar a eficiência do uso da água na agricultura em regiões que sofrem com risco de escassez. Entretanto, ainda não existe consenso sobre qual a dose ideal/efetiva a ser considerada quando do uso desse condicionador e há uma lacuna no sentido de identificar o teor de argila a partir do qual os efeitos da aplicação de biocarvão não são perceptíveis. Desse modo, esse trabalho partiu das hipóteses que: 1) as alterações nas propriedades físicas e hídricas causadas pelo biocarvão são maiores em solos arenosos; 2) há um ponto no gráfico de regressão da relação doses de biocarvão x alteração das propriedades do solo, o qual define a dose máxima efetiva; 3) solos que contenham mais que 20% no teor de argila não são modificados de forma evidente em suas propriedades físicas e hídricas quando aplicado o biocarvão. O biocarvão foi adicionado em doses de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 % (em base de volume) em três solos: areia (com 1% de argila), franco arenoso (com 20% de argila) e franco argiloso (com 30% de argila). As amostras foram acondicionadas em cilindros de PVC com 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura e levadas ao processo de incubação por 90 dias. Após esse período procedeu-se as análises para obter as variáveis: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade intrínseca ao ar, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, capacidade de armazenagem de água e condutividade hidráulica saturada. O delineamento utilizado foi o inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 3 (classes texturais de solo) x 7 (doses de biocarvão) com 5 repetições. Solos com predomínio de areia apresentam mais alterações nas propriedades físicas e hídricas em resposta à aplicação de biocarvão quando comparados a solos franco arenoso e franco argiloso, principalmente relacionadas à retenção de água. A dose máxima, para a maioria das variáveis, foi definida para o solo franco arenoso em 20%, para o solo franco argiloso em 25% e para a areia em 35% (dose máxima); ou seja, para o solo arenoso quanto mais biocarvão adicionado, maiores as alterações. As respostas dos solos com conteúdo de argila superior a 20% (franco arenoso e franco argiloso) para as variáveis porosidade total, permeabilidade intrínseca ao ar, capacidade de água disponível e condutividade hidráulica do solo saturado constatam esse valor de conteúdo de argila como limitante à eficiência desse condicionador de solo.

Palavras-chave: condicionador de solo; hidrotentores; água no solo.

ABSTRACT

The use of water retainers soil conditioners, such as biochar, has been increasingly studied in order to increase the efficiency of water use in agriculture in regions that are at risk of scarcity. However, there is still no consensus on what is the ideal/effective dose to be considered when using this conditioner and there is a gap in the sense of identifying the clay content from which the effects of the application of biochar are not perceptible. Thus, this work started from the hypotheses that: 1) changes in physical and water properties caused by biochar are greater in sandy soils; 2) there is a point in the regression graph of the biochar doses x change in soil properties, which defines the maximum effective dose; 3) soils containing more than 20% clay content are not noticeably modified in their physical and water properties when biochar is applied. Biochar was added in doses of 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35% (on a volume basis) in three soils: sand (with 1% clay), sandy loam (with 20% clay) and clay loam (with 30% clay). The samples were placed in PVC cylinders with 0.05 m in diameter and 0.05 m in height and taken to the incubation process for 90 days. After this period, the analyzes were carried out to obtain the variables: soil density, total porosity, macroporosity, microporosity, intrinsic air permeability, field capacity, permanent wilting point, water storage capacity and saturated hydraulic conductivity. The design used was completely randomized in a factorial scheme 3 (textural soil classes) x 7 (biochar doses) with 5 replications. Soils with a predominance of sand show more changes in physical and water properties in response to the application of biochar when compared to sandy loam and clayey loam soils, mainly related to water retention. The maximum dose, for most variables, was defined for the sandy loam soil at 20%, for the clayey loam soil at 25% and for the sand at 35% (maximum dose); that is, for sandy soil, the more biochar added, the greater the changes. The responses of soils with clay content greater than 20% (sandy loam and clayey loam) for the variables total porosity, intrinsic air permeability, available water capacity and hydraulic conductivity of saturated soil confirm this clay content value as a limiting factor to efficiency of this soil conditioner.

Keywords: soil conditioner; water retainers; soil water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Carvão vegetal proveniente de madeira de eucalipto utilizado no presente estudo.....	33
Figura 2	– Peneiras de malha com diâmetro 4,76 mm, 2 mm, 1 mm e 0,5 mm utilizadas para análise de distribuição de tamanho de partículas do carvão vegetal.....	34
Figura 3	– Representação da análise de densidade do carvão vegetal realizada pelo método da proveta	35
Figura 4	– Equipamento utilizado para procedimento da caracterização física do carvão vegetal.....	36
Figura 5	– Localização dos pontos de coleta das amostras do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO no município de Cascavel – CE; e do CAMBISSOLO HÁPLICO no município de Limoeiro do Norte-CE....	37
Figura 6	– Pontos de coleta das amostras do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO no município de Cascavel - CE (A) e do CAMBISSOLO HÁPLICO no município de Limoeiro do Norte-CE (B).....	37
Figura 7	– Análise granulométrica das amostras de solo de um CAMBISSOLO HÁPLICO e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Dispersão física das frações (A); peneiramento das areias para separação das frações silte e argila (B); amostras em repouso aguardando o tempo de sedimentação das partículas de silte (C); amostra de argila coletada (D) para obtenção de massa após secar em estufa a 105°C (E).....	38
Figura 8	– Amostras do solo arenoso, do solo argiloso e do carvão vegetal utilizadas para preparar as amostras do experimento.....	40
Figura 9	– Unidades experimentais preparadas e acondicionadas em cilindros de PVC.....	41
Figura 10	– Amostras saturadas em placa porosa (A) submetidas a -6 kPa na mesa de tensão (B).....	43

Figura 11	– Instrumento utilizado para medir a permeabilidade de amostras indeformadas de solo ao ar.....	44
Figura 12	– Esquema para análise da condutividade hidráulica saturada em permeômetro de carga constante.....	45
Figura 13	– Amostras saturadas em placa porosa (A) submetidas à tensão de 1.500 kPa em câmara de Richards (B).....	46
Figura 14	– Densidade do solo (Ds) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos arenoso, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	49
Figura 15	– Densidade do solo (Ds) da areia, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	50
Figura 16	– Densidade do solo (Ds) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos arenoso, franco arenoso e franco argiloso. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os solos e letras maiúsculas entre as doses.....	51
Figura 17	– Porosidade total do solo em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos arenoso, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	52
Figura 18	– Porosidade Total (PT) da areia, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as	

	doses e letras maiúsculas entre os solos.....	53
Figura 19	– Porosidade total do solo em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os solos e letras maiúsculas entre as doses.....	54
Figura 20	– Macroporosidade do solo (Ma) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos arenoso, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	55
Figura 21	– Microporosidade do solo (Mi) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos arenoso, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	56
Figura 22	– Macroporosidade (Ma) dos solos arenoso, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	57
Figura 23	– Macroporosidade do solo (Ma) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os solos e letras maiúsculas entre as doses.....	58
Figura 24	– Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	59

- Figura 25 – Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) dos solos arenoso, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos..... 60
- Figura 26 – Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%... 61
- Figura 27 – Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade..... 63
- Figura 28 – Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) dos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos..... 64
- Figura 29 – Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos..... 65
- Figura 30 – Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam

	significância a 1% de probabilidade.....	66
Figura 31	– Umidade ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) dos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	67
Figura 32	– Umidade ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	68
Figura 33	– Capacidade de água disponível (CAD) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.....	69
Figura 34	– Capacidade de água disponível (CAD) dos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	70
Figura 35	– Capacidade de água disponível (CAD) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	72
Figura 36	– Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a	

	1% de probabilidade.....	73
Figura 37	– Condutividade hidráulica saturada (Ksat) dos solos de textura arenosa, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	74
Figura 38	– Condutividade hidráulica saturada do solo (Ksat) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de textura arenosa, média e argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Análise granulométrica do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, do CAMBISSOLO HÁPLICO e da mistura de ambos.....	39
Tabela 2	–	Caracterização física do carvão vegetal proveniente de eucalipto.....	47
Tabela 3	–	Área superficial específica, diâmetro médio dos poros e volume total de poros do carvão vegetal de eucalipto a partir das isotermas de adsorção-dessorção de N ₂ (método BET)	48
Tabela 4	–	Análise de variância para densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), permeabilidade intrínseca ao ar (K _{ar}), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de armazenagem de água (CAD) e condutividade hidráulica saturada (K _{sat}).....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Estado da arte do carvão vegetal como condicionador de solo	19
2.2	Atributos físicos e hídricos do solo alterados devido às características do carvão vegetal	22
2.2.1	<i>Densidade e Porosidade do Solo</i>	23
2.2.2	<i>Capacidade de retenção de água e água disponível</i>	24
2.2.3	<i>Condutividade hidráulica</i>	27
2.2.4	<i>Permeabilidade intrínseca do solo ao ar</i>	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Obtenção e caracterização física do carvão vegetal	31
3.2	Coleta e classificação textural dos solos	34
3.3	Preparo das amostras do experimento	37
3.4	Período de incubação	39
3.5	Variáveis analisadas	39
3.6	Análise estatística dos dados	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Caracterização física do carvão vegetal	45
4.2	Atributos físicos relacionados ao ar do solo alterados com a adição do carvão vegetal	46
4.2.1	<i>Densidade do solo (Ds)</i>	46

4.2.2	<i>Porosidade total do solo (PT)</i>	49
4.2.3	<i>Macroporosidade (Ma) e Microporosidade (Mi) do solo</i>	53
4.2.4	<i>Permeabilidade íntreca do solo ao ar (Kar)</i>	57
4.3	Atributos hídricos do solo alterados com a adição do carvão vegetal	59
4.3.1	<i>Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})</i>	60
4.3.2	<i>Capacidade de água disponível (CAD)</i>	67
4.3.3	<i>Condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat})</i>	70
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A - ANÁLISES DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS COM SUAS RESPECTICAS SIGNIFICÂNCIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO	87

1 INTRODUÇÃO

Regiões de clima semiárido apresentam longos períodos de estiagem, pois as chuvas são escassas e, quando ocorrem, são concentradas num curto período acompanhadas de altas temperaturas. Nesses locais há alta evapotranspiração e, com isso, a perda potencial da água do solo é superior à sua reposição, caracterizando períodos de déficit hídrico. Dessa forma, essas regiões merecem destaque para estudos relacionados ao uso da água no solo.

A seca que atingiu o Nordeste de 2012 a 2017 foi a pior dos últimos 30 anos, segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As atividades agrícolas são diretamente afetadas por esses eventos e, portanto, estratégias são necessárias para contornar tais problemas. Com isso, o uso de condicionadores de solos hidroretentores, como o carvão vegetal, vem sendo cada vez mais estudado a fim de aumentar a eficiência do uso da água na agricultura em regiões que sofrem com risco de escassez.

A presença do carvão vegetal na mistura do solo afeta a natureza física do sistema e pode ser propício à permanência e disponibilidade da água, tanto das chuvas quanto da irrigação, por mais tempo na zona radicular das plantas. Em adição a isso, solos arenosos - presentes na região semiárida nordestina- apresentam limitações que dificultam ainda mais o manejo, como baixa retenção de água e de nutrientes e alta susceptibilidade à erosão. Daí, o uso de condicionadores, principalmente nesses solos, pode ser uma estratégia viável.

A *International Biochar Initiative* (IBI) define o biocarvão como “um material sólido obtido a partir da conversão termoquímica de biomassa num ambiente limitado em oxigênio” (IBI, 2015). Ressalta-se que a produção desse material tem o objetivo de aplicá-lo ao solo, pois quando é incorporado, transfere para ele algumas de suas propriedades permitindo uma agricultura mais produtiva, eficiência do uso de recursos naturais (água e solo) em sistemas agrícolas e ajudando a mitigar as mudanças climáticas provocadas pelo homem, ressaltando sua importância tanto do ponto de vista agrônomo, quanto ambiental.

Nos últimos anos, houve aumento considerável no número de pesquisas relacionadas aos efeitos positivos do uso de carvão vegetal sobre os atributos do solo – sejam eles físicos, químicos ou biológicos. Entretanto, ainda não existe consenso sobre qual a dose ideal/efetiva a ser considerada quando do uso desse condicionador.

Além disso, existem relatos na literatura de que as melhorias proporcionadas pela aplicação de carvão vegetal são menos perceptíveis em solos de textura fina e/ou argilosa devido à reatividade da fração argila mascarar a sua ação. Em contrapartida, há uma lacuna no

sentindo de identificar o teor de argila a partir do qual os efeitos da aplicação de carvão vegetal não são perceptíveis.

Desse modo, esse trabalho partiu das hipóteses que: 1) as alterações nas propriedades físicas e hídricas causadas pelo carvão vegetal são maiores em solos arenosos; 2) há um ponto no gráfico de regressão da relação doses de carvão vegetal x alteração das propriedades do solo, o qual define a dose máxima efetiva; 3) solos que contenham mais que 200 g kg^{-1} de argila não são modificados de forma evidente em suas propriedades físicas e hídricas quando aplicado o carvão vegetal.

Com isso, os objetivos desse trabalho foram comparar as alterações causadas pelo carvão vegetal em solo arenoso, franco arenoso e franco argiloso; determinar a dose máxima de carvão vegetal, que proporcione mudanças evidentes nos solos; e verificar a viabilidade de aplicação de carvão vegetal em solos franco arenoso e/ou franco argiloso.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estado da arte do biocarvão como condicionador de solo

Há milhares de anos o homem ao deixar, despropositadamente, restos de vegetais das culturas que plantava para sua subsistência, começou a perceber que nesses locais o solo ficava mais úmido e que a próxima colheita era mais farta. Além disso, as excreções dos animais sobre o solo também contribuíam para maior produtividade das culturas plantadas naquela porção. Perante essas observações, o homem percebeu que, ao adicionar materiais oriundos de resíduos vegetais e animais, a produção de alimentos era mais abundante.

Com o progresso evolutivo, o homem percebeu a necessidade de adicionar ao solo materiais que favorecessem os atributos físicos, químicos e biológicos do solo para que fosse possível manter a produção de alimentos de acordo com a crescente população. Apesar da evolução na agricultura e o avanço em tecnologias até os dias atuais, resíduos vegetais são adicionados ao solo a fim de melhorar seus atributos e proporcionar inúmeros benefícios ao sistema solo-planta (COSTA *et al.*, 2015). Os usos iniciais de condicionadores, produtos que promovem a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou atividade biológica do solo (BRASIL, 2006), resultaram de conhecimentos adquiridos a partir de tentativas e erros muito antes de existir a metodologia científica.

Em 1868, o geólogo James Orton percebeu manchas escuras no solo na região Amazônica e observou que ele se mantinha mais úmido por um prolongado período de tempo e que as culturas que ali cresciam apresentavam maior desenvolvimento quando comparadas às que estavam plantadas em áreas adjacentes. Essa descoberta foi citada como “solo preto e muito fértil” em seu livro “Os Andes e a Amazônia”, em 1870 (WAYNE, 2012). Em 1878, Barrington Brown e William Lidstone publicaram um relatório científico no qual o nome “Terra Preta” foi usado pela primeira vez e denominou esses solos como “Terra Preta de Índio” (TPI) (DE GISI *et al.*, 2014). Essas manchas de solo despertaram interesse em outros pesquisadores, como Smith em 1879 e Hartt em 1885 e a partir daí a ciência do solo passou a ter um olhar mais atento a esse fato.

A sua cor escura e sua alta fertilidade é descrita em literatura como consequência do processo de queima de materiais orgânicos, como ossos de animais e humanos, excrementos, restos de vegetais, etc. das comunidades que ali viviam (GLASER, 2007). Verificou-se, ainda, que o carbono presente é principalmente na forma de carbono pirogênico

(subproduto do processo de queima de um material orgânico) e pode ser até seis vezes mais estável do que no solo adjacente (GLASER, 2001).

Em contrapartida, Silva *et al.* (2021) encontraram evidências diretas e indiretas de que processos naturais formaram as TPI na Amazônia brasileira com a entrada de origem externa de carbono e elementos minerais por meio de deposição aluvial, começando vários milhares de anos antes – e em várias ordens de magnitude maiores – das primeiras evidências de manejo do solo para cultivo de plantas na região. Esses autores explicam que os povos indígenas usaram seus conhecimentos para identificar e ocupar preferencialmente áreas de alta fertilidade para proceder os cultivos que contribuíram às propriedades únicas das TPI, porém não foram responsáveis por sua gênese.

Devido às qualidades observadas na TPI, o interesse de pesquisadores do mundo inteiro foi despertado para obter um produto que, aplicado ao solo, apresentasse propriedades similares a esta. Assim, pesquisadores começaram a aplicar carvão vegetal no solo e o nomearam assim de *biochar*, definido como “um material sólido obtido a partir da conversão termoquímica de biomassa num ambiente limitado em oxigênio” (IBI, 2015). O nome *biochar* é oriundo de uma combinação de bio "*biomass*" e char "*charcoal*" (CHANDRAN *et al.*, 2019) e em português é conhecido como biocarvão. A diferença do carvão vegetal para o biocarvão é que este é produzido especificamente para aplicação no solo, ou seja, distinguem-se apenas pelo propósito (SOHI *et al.*, 2010).

Os estudos com biocarvão são relativamente recentes quando comparados à idade da inspiração de sua origem – a “Terra Preta de Índios” (MADARI *et al.*, 2012), tendo o estudo pioneiro com aplicação de carvão vegetal no final da década de 40, com trabalho de Tryon (1948). No Brasil, os estudos sobre carvão vegetal iniciaram no início desse século. Em 2006, o pesquisador brasileiro Wenceslau Teixeira da EMBRAPA Solos, que desde 1999 estuda solos da Amazônia, participou do trabalho “Ensaio de Biocarvão têm como objetivo enriquecer o solo para pequenos produtores”. Também da EMBRAPA Solos, o pesquisador Etelvino Henrique Novotny tem contribuído para pesquisas sobre biocarvão, inclusive fazendo parte do trabalho “Avanços na pesquisa de biocarvão no Brasil.” Esses pesquisadores já publicaram vários trabalhos, assim como as pesquisadoras Cláudia Maia e Beata Madari, que muito contribuíram para a pesquisa do biocarvão no Brasil.

Nos últimos anos, a produção de biocarvões vem crescendo, juntamente com as pesquisas; suas características e propriedades têm sido amplamente estudadas. Os trabalhos científicos mostram seus benefícios ao ser aplicado ao solo, mas seu real potencial como condicionador deve ser ainda explorado, pois existem também limitações que podem

restringir alguns tipos de biocarvões de serem utilizados em determinadas situações, como por exemplo, biocarvões oriundos de lodo de esgoto e resíduos animais (WANG *et al.*, 2008; SAMOLADA; ZABANIOTOU, 2014).

A estrutura policíclica aromática condensada do biocarvão é o que garante a sua estabilidade e é responsável pelo seu longo tempo de residência no solo (WEI *et al.*, 2014). Devido à essa recalcitrância – resistência à degradação –, a comunidade científica tem dado atenção a essa propriedade que o material possui, de modo a melhorar as características físicas, químicas e biológicas de solos por um período prolongado.

Apesar do elevado teor de carbono e a aromaticidade serem características mais genéricas da maioria dos biocarvões, a exata composição química e estrutural deve ser analisada em cada material produzido. As características e propriedades do biocarvão variam muito devido ao tipo de biomassa e condições da pirólise, por isso é necessário conhecê-las antes da sua aplicação (VERHEIJEN *et al.*, 2010). Na literatura consta que biocarvões produzidos com o mesmo tipo de biomassa, porém em diferentes temperaturas, apresentam propriedades distintas e, conseqüentemente, efeitos diferentes quando aplicados ao solo (TOMCZYK *et al.*, 2020; ELNOUR *et al.*, 2019; CONZ *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017).

Dos efeitos reportados pelos diversos estudos sobre aplicação de biocarvão em solos observam-se efeitos positivos, porém efeitos negativos também foram encontrados (AZZAZ *et al.*, 2020; GAO *et al.*, 2020; GONZAGA *et al.*, 2018; LIAN; XING, 2017; XU *et al.*, 2016). A interação do biocarvão com o solo depende de diversos fatores como o tipo de solo, propriedades do biocarvão e clima do local de estudo (JOSEPH *et al.*, 2010). Deve ser ressaltado que o uso do biocarvão vem trazendo benefícios aos atributos do solo, porém seu uso não deve ser de forma aleatória - a qualquer dose ou a um campo em qualquer lugar do mundo. Além do que a aplicação do biocarvão nem sempre levará ao aumento de rendimento, como demonstrado em Gonzaga *et al.* (2018), podendo, inclusive, prejudicar a liberação de nutrientes e apresentar riscos ambientais potenciais como apresentado por El-Naggar *et al.* (2019).

É importante ressaltar que em muitos trabalhos o impacto de biocarvão foi maior em solos arenosos do que em argilosos, já que nestes a argila já contribui bastante nos fenômenos acima mencionados. Além disso, a pesquisa em solos alterados, degradados ou altamente intemperizados comparado aos ricos em matéria orgânica, mostraram resultados mais significativos com o uso do biocarvão (OUYANG *et al.*, 2013), já que estes últimos contribuem na armazenagem de água tanto pela alta área de superfície específica, quanto pela presença de cargas.

O uso de biocarvão em solos agrícolas foi recentemente sugerido como uma ferramenta eficaz em longo prazo para reduzir os impactos negativos da seca no Nordeste do Brasil, melhorando a capacidade de retenção de água no solo (MANGRICH *et al.*, 2015). Os estudos sobre esse condicionador devem continuar para que se possa utilizá-lo de forma eficiente, respeitando a capacidade de uso do solo.

2.2 Atributos físicos e hídricos do solo alterados devido às características do biocarvão.

A palavra “física” tem origem grega (*physis*) e significa natureza, portanto a Física do Solo é a área da Ciência do Solo que estuda a natureza e os fenômenos do sistema solo- água- planta- atmosfera. O principal contexto da Física do Solo é estudar os processos do solo que envolvem o suporte ao crescimento radicular das plantas, a armazenagem e suprimento de água e nutrientes, e as trocas gasosas. Com isso, alguns atributos do solo são explorados a fim de compreender as relações que existem nesse sistema, sendo eles: densidade, porosidade, retenção e capacidade de armazenamento de água, condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar.

O biocarvão promove alterações nos atributos físicos do solo, como redução da densidade do solo, aumento da macroporosidade e da estabilidade do agregado, melhoria na capacidade de retenção de água e na condutividade hidráulica do solo saturado (OGUNTUNDE *et al.*, 2008; ASAI *et al.*, 2009; HERATH *et al.*, 2013; HARDIE *et al.*, 2014). Vale ressaltar que essas modificações dependem do tipo de solo que receberá esse produto, assim como o tipo de biomassa e condições de pirólise do carvão, além da sua granulometria e doses aplicadas.

Segundo Lei e Zhang (2013), a matéria-prima lenhosa produz biocarvão com uma porosidade e área de superfície específica (ASE) maiores em comparação com alguns resíduos agrícolas e resíduos de alimentos. Entretanto, a maioria dos estudos mostra que pirólise a temperatura mais alta resulta em ASE mais alta (ZHAO *et al.*, 2018, SUN *et al.*, 2014); com o aumento de temperatura há maior perda de massa (redução de sólidos voláteis) e como consequência a formação de poros, que contribuem para a aumentar a área superficial do composto (LIAN; XING, 2017). Logo, o biocarvão proveniente de eucalipto, mas produzido a temperaturas mais baixas, pode não apresentar elevada ASE.

2.2.1 Densidade e Porosidade do Solo

A porosidade total do solo pode ser dividida em macro e microporosidade, as quais regulam o fluxo de gases e água e retenção de água, respectivamente. Solos arenosos possuem maior quantidade de macroporos ($\geq 50 \mu\text{m}$) e quantidade restrita de microporos ($< 50 \mu\text{m}$) e, portanto, têm menor capacidade de reter água e geralmente boa aeração; o oposto ocorre com solos argilosos.

Durante a decomposição térmica da biomassa no processo de produção do biocarvão, a perda de massa ocorre principalmente na forma de voláteis orgânicos, o que induz a formação de vazios que formam uma extensa rede de poros (SONG; GUO, 2012). A estrutura microporosa do biocarvão quando incorporada ao solo, contribuirá para o aumento de poros de menor diâmetro (HUSSAIN *et al.*, 2021).

Os poros do biocarvão são classificados em três categorias (DOWNIE *et al.* (2009), de acordo com seus diâmetros internos: macroporos ($> 50 \text{ nm}$), mesoporos (entre 2 nm e 50 nm) e microporos ($< 2 \text{ nm}$). Essas categorias têm ordens de magnitude diferentes das categorias padrão para tamanhos de poros na ciência do solo e isso cria obstáculos na comunicação com qualquer público fora da pesquisa de biocarvão.

O aumento da porosidade nos solos após a aplicação do biocarvão é resultante dos poros internos das partículas do biocarvão (Φ intraporosidade) e de poros formados entre o biocarvão e as partículas do solo (Φ interporosidade) (MASIELLO *et al.* 2015). Dependendo do tamanho do poro, da conectividade do poro e da hidrofobicidade da superfície da partícula, esses dois tipos de porosidade podem ou não ser eficazes para o fluxo ou armazenamento de água. Quando os poros são conectados, a água se move mais rapidamente em poros maiores do que em poros menores e, portanto, poros maiores dominam o fluxo de água através de meios porosos (LIU *et al.* 2016).

A aplicação de biocarvão afeta diretamente a densidade do solo; que é a relação entre a massa de solo e o seu volume (volume dos sólidos + volume dos poros), o incremento da porosidade do biocarvão diminuirá a densidade do solo, devido ao aumento do volume de poros. De maneira indireta a densidade do biocarvão também afetará a densidade do solo pelo efeito da mistura, pois a densidade desse material é muito baixa (podendo apresentar valores entre $0,25\text{--}0,60 \text{ g cm}^{-3}$, dependendo da biomassa que o originou) (GUO, 2016).

Em meta-análise realizada por Razzaghi *et al.* (2020), a densidade do solo diminuiu após a correção com o biocarvão; reduziu em, aproximadamente, 11% para os solos de textura grossa (areia e areia franca) e de textura fina (argila, franco argilosa, argilo siltosa,

silte e franco argilo siltosa) em comparação com solos de textura média (franco arenoso, franco, argilo arenosa), em que a densidade foi reduzida, aproximadamente, em 7%. Também foi comparado o local onde se realizou o experimento (laboratório, campo ou em casa de vegetação e experimentos em vasos) e foi constatado que, independentemente disso, o biocarvão reduziu consistentemente a densidade do solo para o mesmo grupo de textura do solo.

2.2.2 Capacidade de retenção de água e água disponível

A capacidade de retenção de água no solo é a máxima quantidade de água, fornecida por pluviosidade ou irrigação, que um solo pode reter. Já a disponibilidade de água às plantas, conhecida também como capacidade de água disponível (CAD), é o volume contido entre a capacidade de campo (1,0 mca) e o ponto de murcha permanente (155,0 mca) (KLEIN, 2014).

O aumento da capacidade de retenção de água no solo é um dos principais efeitos da utilização do biocarvão sobre as culturas, mas vale ressaltar que isso pode variar com o tipo e a taxa de aplicação de biocarvão (BRANTLEY *et al.* 2015). Numa revisão de literatura, Edeh *et al.* (2020) concluíram que entre 30 e 70 Mg ha⁻¹ de biocarvão são necessários para aumentar a água disponível em solos arenosos, embora aplicações de biocarvão <30 Mg ha⁻¹ em solos argilosos tenham sido suficientes para promover resultados significativos. Logo, se o solo passa a armazenar mais água como consequência da presença do biocarvão, a frequência de irrigação da cultura pode ser reduzida, diminuindo o custo de produção, otimizando o uso da água e aumentando o rendimento do cultivo nesse solo.

O biocarvão, devido à sua porosidade e à sua alta superfície específica, pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, especialmente em solos de textura arenosa (ATKINSON *et al.*, 2010; PEAKE *et al.*, 2014), que têm baixa capacidade de armazenamento de água, sendo esta influenciada pela pequena área de superfície específica das partículas de areia (0,01 a 0,1 m² g⁻¹) e da pequena quantidade de poros menores que 50 µm, responsáveis pela retenção de água. Razzaghi *et al.* (2020) apresentaram em sua meta-análise que o biocarvão aumentou em média 45% a CAD nos solos de textura grossa (argila <15%), enquanto houve aumento de 21% nos solos de textura média (argila: 15 a 30%) e 14% em solos de textura fina (argila >30%). Isso indica que o aumento da água disponível pode ser cerca de duas ou três vezes maior em solos de textura grossa do que em solos de texturas média e fina, respectivamente.

A retenção de água é determinada pela distribuição e conectividade da rede porosa, que dependem do tamanho das partículas, do tamanho dos poros e do conteúdo em matéria orgânica do solo (BRADY e WEIL, 2002). Portanto, a adição de condicionadores que contribuam na formação da rede capilar pode potencialmente resultar em melhorias no sistema de armazenamento de água no solo (NÓBREGA, 2011) e isso tem sido observado após a aplicação de biocarvão (SAFFARI *et al.*, 2021; MEI *et al.*, 2021; ALGHAMDI, 2018, GŁĄB *et al.*, 2016). O uso de biocarvão como um meio para melhorar a capacidade de retenção de água do solo, surgiu após a identificação de sua alta porosidade (HINA *et al.*, 2010; LIANG *et al.*, 2006). No entanto, a alta porosidade nas partículas de carvão não aumenta necessariamente a quantidade de água disponível no solo (LAL; SHUKLA, 2004).

Em solos arenosos, o volume adicional de água e nutrientes solúveis armazenados nos microporos do biocarvão podem tornar-se disponíveis à medida que o solo seca. Isso pode levar ao aumento da disponibilidade de água à planta durante períodos secos (VERHEIJEN *et al.*, 2010). Nesse aspecto, solos do semiárido têm limitações à disponibilidade de água, considerando-se, por exemplo, o regime pluviométrico de até 800 mm de chuvas anuais. Esses solos podem ser beneficiados com a aplicação desse condicionador de solo, já que aumentará a retenção de água recebida (pluviosidade/irrigação). Ali *et al.* (2017) concluíram em sua pesquisa que a aplicação de biocarvão melhorou as propriedades físicas do solo sob fornecimento limitado de água, o que se torna útil para o crescimento das plantas em condições semiáridas.

Avaliando a capacidade potencial do biocarvão em aumentar a retenção de água em experimento em casa de vegetação, Devereux *et al.* (2012) constataram que o diâmetro médio dos poros diminuiu de 0,07 mm para 0,046 mm comparando o tratamento controle com a dose 5% de biocarvão no solo. Os autores concluíram que o biocarvão pode aumentar a disponibilidade de água no solo em locais propensos a períodos de seca.

Com base nos resultados da meta-análise feita por Edeh *et al.* (2020), a propriedade física do biocarvão que teve o maior efeito e que mais afeta as propriedades da água do solo é a área de superfície específica (ASE) que se refere à área exposta por unidade de massa do solo ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) (GROHMANN, 1972). A ASE pode ser também expressa em volume ($\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$) e é uma característica que influencia diretamente na retenção de água e nutrientes, pois os principais fenômenos da interação das fases sólida, líquida e gasosa dão-se em superfície e expressam o comportamento do solo (AMARO FILHO *et al.*, 2008).

O biocarvão é um material que possui elevada área de superfície e pode potencialmente resultar em melhorias no sistema de armazenamento de água nos solos,

principalmente nos arenosos que têm baixa superfície específica. As áreas de superfície de areia grossa e areias finas são $0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ e $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente, portanto, adicionar biocarvão aumentaria a área de superfície do solo arenoso (LI *et al.*, 2021). Estudos observaram aumento na retenção de água com o aumento da ASE do biocarvão (AJAYI; HORN, 2016; LIU *et al.*, 2017; SPERATTI *et al.*, 2017; SULIMAN *et al.*, 2017; VILLAGRA-MENDOZA; HORN, 2018).

Edeh *et al.* (2020) constataram, por meio de meta-análise, que ocorre um aumento da CAD à medida que se incrementa a ASE; estudos que usaram biocarvão com ASE $> 300 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ tiveram um aumento na CAD de 33,3% maior que os que usaram biocarvão com ASE $< 20 \text{ m}^2 / \text{g}$. Esses autores ainda apresentaram estudos nos quais o biocarvão com ASE $> 300 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ aumentou a CAD e a CC em 70% e 52%, respectivamente, quando comparado ao controle.

A área de superfície específica é influenciada pelo tamanho das partículas que compõem o sistema; no caso do biocarvão, as partículas de tamanho menor têm maior área de superfície e maior quantidade de microporos, o que pode implicar numa maior retenção de água (BLANCO-CANQUI, 2017). Em contrapartida, Trifunovic *et al.* (2018) observaram maior retenção de água com adição de biocarvão, independentemente do tamanho das suas partículas. Esses autores atribuíram a melhor retenção de água das misturas biocarvão com areia devido ao aumento da porosidade e retenção capilar de água. Jin *et al.* (2017) estudaram três tamanhos de partículas de biocarvão de madeira: finas ($\leq 0,841 \text{ mm}$), grossas ($0,84 - 4,76 \text{ mm}$) e não peneiradas, que foram misturadas a areia e concluíram que a adição do biocarvão diminuiu a densidade do solo e aumentou a porosidade em comparação ao controle, independentemente do tamanho das partículas do biocarvão.

Além desses fatores descritos, a taxa de aplicação de biocarvão é um fator relevante e deve ser estudada antes de aplicar o material no solo. Um aumento linear na CAD e redução em K_{sat} em função da taxa de aplicação foram relatados em muitos trabalhos, mesmo com altas taxas de aplicação - cerca de $400 \text{ t} / \text{ha}$ (BRUUN *et al.*, 2014; DE MELO CARVALHO *et al.*, 2014; LIM *et al.*, 2016). Edeh *et al.* (2020) apresentaram numa meta-análise que entre 30 e 70 Mg ha^{-1} de biocarvão são necessários para aumentar a água disponível em solos arenosos, mas para solos argilosos uma taxa menor que 30 Mg ha^{-1} de biocarvão já é suficiente. Sun *et al.* (2014) apresentaram que a quantidade de água disponível retida num solo argiloso foi 1,4%, 6,1% e 18,4% maior para os tratamentos com 20, 40 e 60 g kg^{-1} (2, 4 e 6% $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) de biocarvão do que a água retida pelo solo controle.

Vale ressaltar que há resultados de pesquisas positivos, negativos e inalterabilidade da retenção de água no solo com aplicação de biocarvão e, portanto, deve-se atentar ao uso de diferentes materiais, aos tipos de solo e às doses aplicadas, pois cada fator responderá de forma distinta. Glab *et al.*, 2018 e Villagra-Mendoza e Horn, 2018, por exemplo, relataram um aumento na retenção de água no solo; Carvalho *et al.*, 2016 e Madari *et al.*, 2017, diminuição; e Baiamonte *et al.*, 2019 e Obia *et al.*, 2016 não observaram alterações.

Razzaghi *et al.* (2020) observaram incremento no conteúdo de água do solo retido na capacidade de campo e ponto de murcha nos solos de textura grossa e média, mas diminuíram para os solos de textura fina, evidenciando que o impacto do biocarvão no conteúdo de água do solo depende do tipo de solo.

Em estudo a fim de avaliar dois biocarvões em solos de textura fina e grossa, Wang *et al.* (2019) constataram que o de casca de noz, com o maior volume de poro e maior ASE, aumentou a CC e a CAD de solos de textura grossa no curto prazo, porém o de madeira macia (madeira de árvores gimnospermas) não impactou significativamente a CC de nenhum dos dois solos, ressaltando que a depender das características do biocarvão o impacto na retenção de água pode ser limitado.

Ao estudar o efeito do biocarvão na retenção de água em solos cultivados com milho, Tanure *et al.* (2019) observaram que os ganhos de retenção de água proporcionados pelo biocarvão não foram suficientes para superar os problemas de estresse hídrico no solo cultivados com milho, pois incrementou a retenção de água, mas não houve aumento na água disponível. Burrell *et al.* (2016), ao estudar efeito de um biocarvão de lascas de madeira a uma dose de 3% (g. g⁻¹) em três solos agrícolas com 10,77%, 16,97% e 32,7% de argila, também não encontraram impacto consistente na água disponível às plantas.

Nem toda a água disponível, retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, necessariamente é utilizada da mesma forma pelas plantas, pois à medida que o solo perde água, a tensão aumenta, aumenta o gasto de energia das raízes para absorção dos nutrientes e, conseqüentemente, da água. Além disso, quanto mais seco o solo, menor a condutividade hidráulica e a movimentação da água em direção às raízes (KIEHL, 1979).

2.2.3 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo é um coeficiente que expressa a facilidade com que a água nele é transportada e que depende das suas propriedades, como a porosidade,

a distribuição de tamanho e forma de suas partículas, a superfície específica e a tortuosidade (LIBARDI, 2018). O estado de umedecimento mais comum do solo agrícola é o da não saturação e, nesse caso, a quantificação do movimento da água dentro do solo torna-se bem mais complexa do que para solos saturados (AMARO FILHO *et al.*, 2008). Por questões práticas, em estudos da determinação em laboratório, faz-se a análise da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}).

Solos de textura arenosa têm K_{sat} maior do que solos de textura argilosa, embora sua porosidade total seja menor (SCHOONOVER; CRIM, 2015). Isso ocorre porque, apesar dos solos de textura arenosa ter uma menor porosidade total, têm poros de maior diâmetro; poros de maior diâmetro e contínuos têm maior condutividade hidráulica (KARAHAN; ERŞAHIN, 2016).

Consta em literatura que o biocarvão pode aumentar ou diminuir a condutividade hidráulica do solo, dependendo do tipo e quantidade de biocarvão aplicado e do tipo do solo (EDEH *et al.*, 2020; OMONDI *et al.*, 2016; BLANCO-CANQUI, 2017).

Lim *et al.* (2016) relatou que a K_{sat} diminuiu quando o biocarvão foi adicionado a um solo de textura arenosa e aumentou quando adicionado a uma argila. Eles explicaram que em solos arenosos a adição do biocarvão levou a uma mudança de macroporos (poros de transmissão) para meso / microporos (poros de armazenamento), reduzindo seu K_{sat} e aumentando a retenção de água. Já em solos argilosos, houve aumento da condutividade hidráulica do solo após a aplicação de biocarvão.

Githinji (2014) declarou que a mistura de grandes partículas de biocarvão (<2 mm) com partículas inorgânicas de solo predominantemente menores pode aumentar o espaço dos poros e, conseqüentemente, aumentar o fluxo de água.

Edeh *et al.*, 2020 constataram que a aplicação de biocarvão aumenta a condutividade hidráulica do solo saturado em 36% em solos de textura média e 28% em solos de textura fina. Em uma revisão, Blanco - Canqui (2017) explicou que a aplicação de biocarvão aumentou de 25 a 328% a condutividade hidráulica em solos saturados de textura fina (solos franco, franco argiloso e argiloso).

O biocarvão pode ajudar a melhorar a K_{sat} e a taxa de infiltração, especialmente em solos com alto teor de argila e/ou compactados, controlando assim a erosão, inundação e poluição de córregos (LI *et al.*, 2018; LIM *et al.*, 2016; OBIA *et al.*, 2018; SHENG-GAO, 2015).

Lim *et al.* (2016), ao adicionar biocarvão em solos de textura arenosa e argilosa, observaram que no solo arenoso, o aumento das taxas de aplicação de biocarvão diminuiu o

valor da K_{sat} e a incorporação de biocarvão ao solo argiloso mal drenado aumentou inversamente o valor da K_{sat} . Esses autores afirmam que o aumento nas taxas de aplicação do biocarvão diminuiu acentuadamente a K_{sat} na areia grossa e essa redução na K_{sat} pode ser vantajosa em solos com textura arenosa, pois as raízes das plantas ficariam em contato com a água por mais tempo.

Brockhoff *et al.* (2010), ao adicionar biocarvão em solo arenoso, observaram que houve redução de aproximadamente 92% da condutividade hidráulica do tratamento controle para o tratamento adicionado a 25% (v/v) de biocarvão (maior dose). Githinji (2013) observou também um decréscimo linear na K_{sat} com taxa crescente de biocarvão (25%, 50%, 75% e 100%) comparado ao solo sem adição desse condicionador.

2.2.4 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar})

Assim como a água, o ar do solo é imprescindível para o bom desenvolvimento das culturas e, portanto, a aeração do solo deve ser considerada ao estudar alterações dos atributos físicos do solo. Os macroporos, os quais compreendem a porosidade livre de água (ou macroporosidade), e suas respectivas conexões são importantes parâmetros a serem avaliados, pois são mais eficientes nos processos de fluxo de ar (SAMPAIO *et al.*, 2006; RODRIGUES *et al.*, 2011; AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008). Qualquer alteração que possa bloqueá-los, seja no conteúdo de água ou na estrutura do solo, a dinâmica dos gases é alterada e a K_{ar} é reduzida (SILVEIRA JUNIOR *et al.*, 2012; RODRIGUES, 2009).

Um dos parâmetros para verificar a condução de ar no solo é a K_{ar} , que é definida como a capacidade do solo em permitir a passagem do ar por fluxo de massa (RODRIGUES, 2011). Desse modo, quanto maior a K_{ar} , maior é a possibilidade das trocas gasosas entre solo e atmosfera ocorrerem sem restrições, principalmente entre O_2 e CO_2 (BRITO, 2010).

Quando todos os poros do solo estão livres de água (solo seco) a K_{ar} assume o seu valor máximo e, à medida que o ar nos poros vai sendo substituído por água, o valor de K_{ar} vai reduzindo até quando todo volume de poros é preenchido por água e obtém-se valor zero (BALL; SCHØNNING, 2002; BRADY; WEIL, 2002). Logo, quanto maior a variação da umidade no solo, maior a variação na porosidade de aeração e, conseqüentemente, no valor de K_{ar} (BEUTLER *et al.*, 2001; MESQUITA; MORAES, 2004; RODRIGUES, 2009; SILVA *et al.*, 2009; HUANG *et al.*, 2016). À vista disso, a adição de carvão vegetal promoverá

mudanças na porosidade de aeração do solo devido à sua capacidade de aumento da umidade do solo.

Conforme mencionado por Kolb *et al.* (2007), a permeabilidade ao ar do solo adicionado ao biocarvão foi maior do que no solo sem o seu uso devido à maior porosidade cheia de ar do biocarvão permitindo mais fluxo de gás (SUN *et al.*, 2013a).

Amoakwah *et al.* (2017) observaram que a aplicação de biocarvão de espiga de milho não teve efeito sobre a relação porosidade de aeração e poros conectados. Embora não tenha tido diferenças significativas, os tratamentos com biocarvão tenderam a ter maiores valores de permeabilidade ao ar do que o controle. Pranagal e Kraska *et al.*, (2020) também observaram que, mesmo sem diferença estatística, o biocarvão aplicado ao solo causou apenas um ligeiro aumento da K_a , porém esse efeito foi visível apenas nos dois primeiros anos após a aplicação e principalmente na camada de 0–10 cm.

Wong *et al.* (2016) constataram que a permeabilidade ao ar diminui com o aumento do conteúdo de biocarvão, em graus relativamente altos de compactação da argila, porém em baixo grau de compactação, os efeitos do biocarvão foram insignificantes.

Nota-se que as alterações na permeabilidade do ar em diferentes estudos são contraditórias, portanto, é necessário avaliar cada caso, pois o tipo e o solo no qual foi aplicado ocasionará comportamentos distintos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção e caracterização física do carvão vegetal

O carvão vegetal foi produzido a 400 °C a partir do processo de pirólise lenta utilizando como matéria-prima madeira de eucalipto. Esse processo foi realizado pela empresa FERBASA - Companhia de Ferro Ligas da Bahia, produtora de carvão vegetal que é utilizado na siderurgia da empresa. As frações menores que 8 mm são inadequadas para uso na indústria siderúrgica e então faz-se a categorização do carvão vegetal usando peneiras de 8 mm acopladas a vibradores mecânicos.

Com o intuito de colaborar com o destino de resíduos e analisar o comportamento físico e hídrico do solo com a aplicação desse material, as frações do carvão menores que 8 mm foram utilizadas no presente estudo (Figura 1). O carvão vegetal quando criado para fins agrônômicos é denominado 'biocarvão'.

Figura 1 - Carvão vegetal proveniente de madeira de eucalipto utilizado no presente estudo.



Fonte: Autora.

Para as análises de caracterização do carvão vegetal foram utilizadas metodologias propostas e publicadas no relatório *Standardized product definition and testing guidelines for biochar that is used in soil* sugeridas pelo *International Biochar Initiative* (IBI, 2015). Para outras características que ainda carecem de metodologia padronizada foram

utilizadas metodologias que fazem parte da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a qual é citada no relatório do IBI correspondente às orientações de melhores práticas para o desenvolvimento de padrões.

A distribuição por tamanho de partículas (DTP) do carvão vegetal foi realizada por peneiramento a seco, conforme exigido no guia publicado pelo IBI mencionado anteriormente. Utilizou-se as peneiras de malha com diâmetro 4,76 mm, 2 mm, 1 mm e 0,5 mm e cada uma das frações retidas nas peneiras foi pesada em balança analítica (Figura 2).

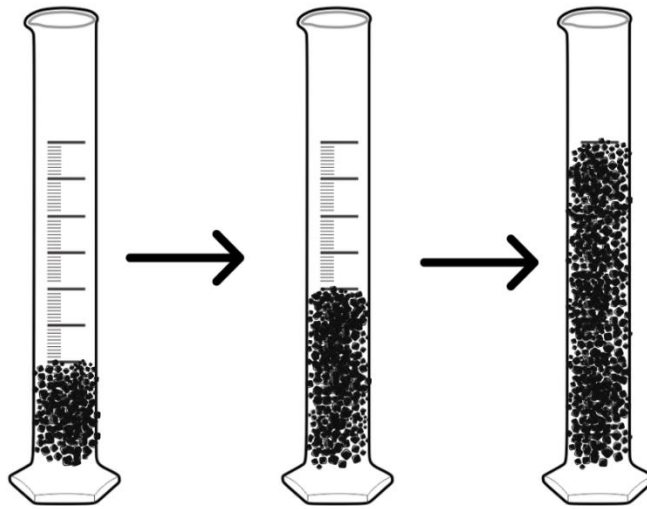
Figura 2 - Peneiras de malha com diâmetro 4,76 mm, 2 mm, 1 mm e 0,5 mm utilizadas para análise de distribuição de tamanho de partículas do carvão vegetal.



Fonte: Autora.

A análise da densidade do carvão foi realizada pelo método da proveta conforme a metodologia ASTM D2854. Para proceder tal análise uma porção do carvão vegetal foi previamente colocada em estufa a 105° para obter a massa seca em estufa (MSE). Em seguida, esse material foi inserido lentamente, com auxílio de um funil, em cerca de 1/3 de uma proveta graduada com capacidade para 100 mL (com massa conhecida), batendo-a 10 vezes sobre um emborrachado de 5 mm de espessura, a uma altura de queda de cerca de 5 cm. Repetiu-se esse procedimento para preencher 2/3 da proveta e posteriormente até completar o volume total (Figura 3). Posteriormente, foi determinada a massa de carvão vegetal por meio de balança analítica e por relação de massa e volume, obteve-se a densidade do material.

Figura 3 - Representação da análise de densidade do carvão vegetal realizada pelo método da proveta.

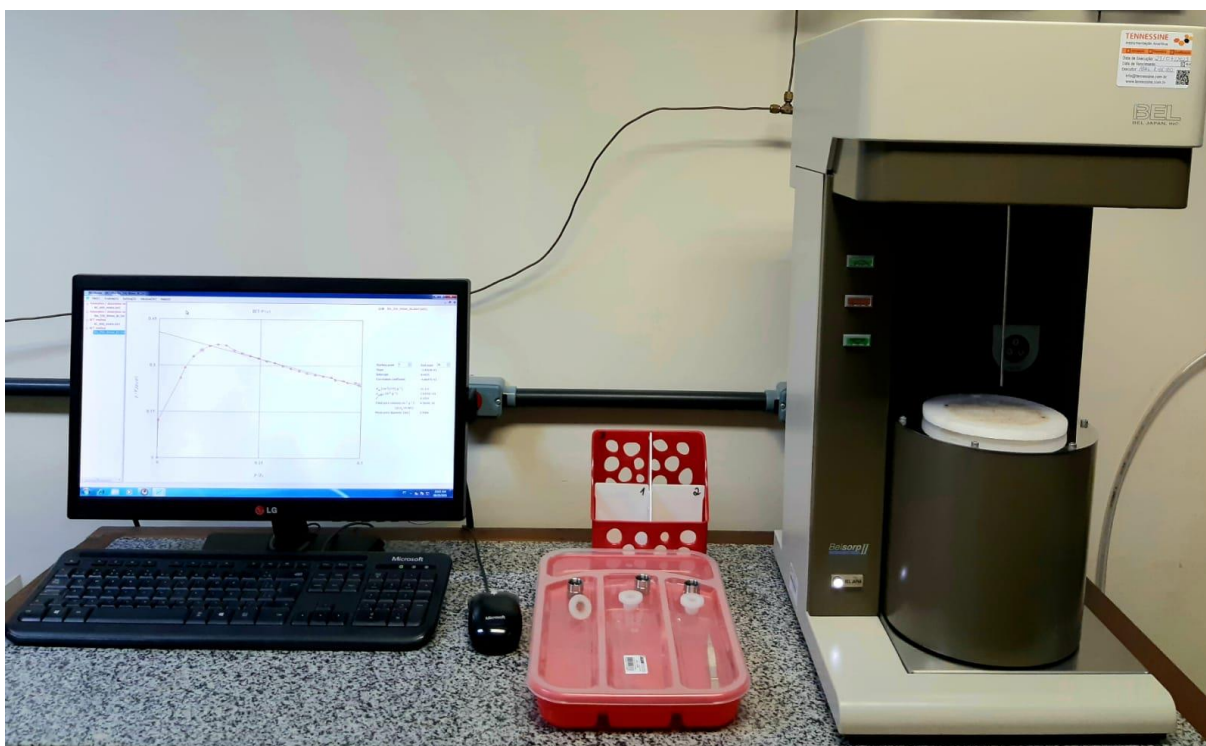


Fonte: Autora.

A capacidade de retenção de água foi determinada pelo método da mesa de tensão (OLIVEIRA, 1968), onde amostras de carvão vegetal foram dispostas em anéis de borrachas e submetidas à tensão de 6 kPa. Após as amostras entrarem em equilíbrio na tensão aplicada, foi obtida a massa por meio de balança analítica. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105°C até atingir massa constante a fim de conhecer sua massa seca e, por diferença, constatar o teor de água que o carvão vegetal foi capaz de reter.

As medidas da área superficial específica, volume total de poros e diâmetro médio de poro do carvão vegetal foram determinadas a partir das isotermas de adsorção-dessorção de N₂ (método BET) a -196°C, utilizando-se um equipamento da marca Belsorp-II (Figura 4) pertencente ao Laboratório de Materiais Funcionais Avançados (LaMFA) do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.

Figura 4 - Equipamento utilizado para caracterização física da área superficial específica, volume total de poros e diâmetro médio de poro do carvão vegetal.



3.2 Coleta e classificação textural dos solos

Foram coletadas amostras sem estrutura preservada de um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, situado no município de Cascavel – CE (Figura 5), numa camada de 0,2 - 0,4 m, buscando obter amostras com textura arenosa (Figura 6A). Também foram coletadas amostras na camada de 37- 60 cm (Figura 6B), a fim de obter amostras com textura argilosa de um CAMBISSOLO HÁPLICO na Unidade de Pesquisa e Extensão UEPE, pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE - Campus Limoeiro do Norte), no município de Limoeiro do Norte-CE (Figura 5).

As amostras foram secas em sala ventilada e posteriormente destorroadas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm de diâmetro a fim de obter-se terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras de solo com textura arenosa foram lavadas em água corrente a fim de retirar resíduos e material orgânico que pudesse fazer parte das amostras, tendo assim, apenas areia em sua composição.

Figura 5 - Localização dos pontos de coleta das amostras do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO no município de Cascavel – CE; e do CAMBISSOLO HÁPLICO no município de Limoeiro do Norte-CE.

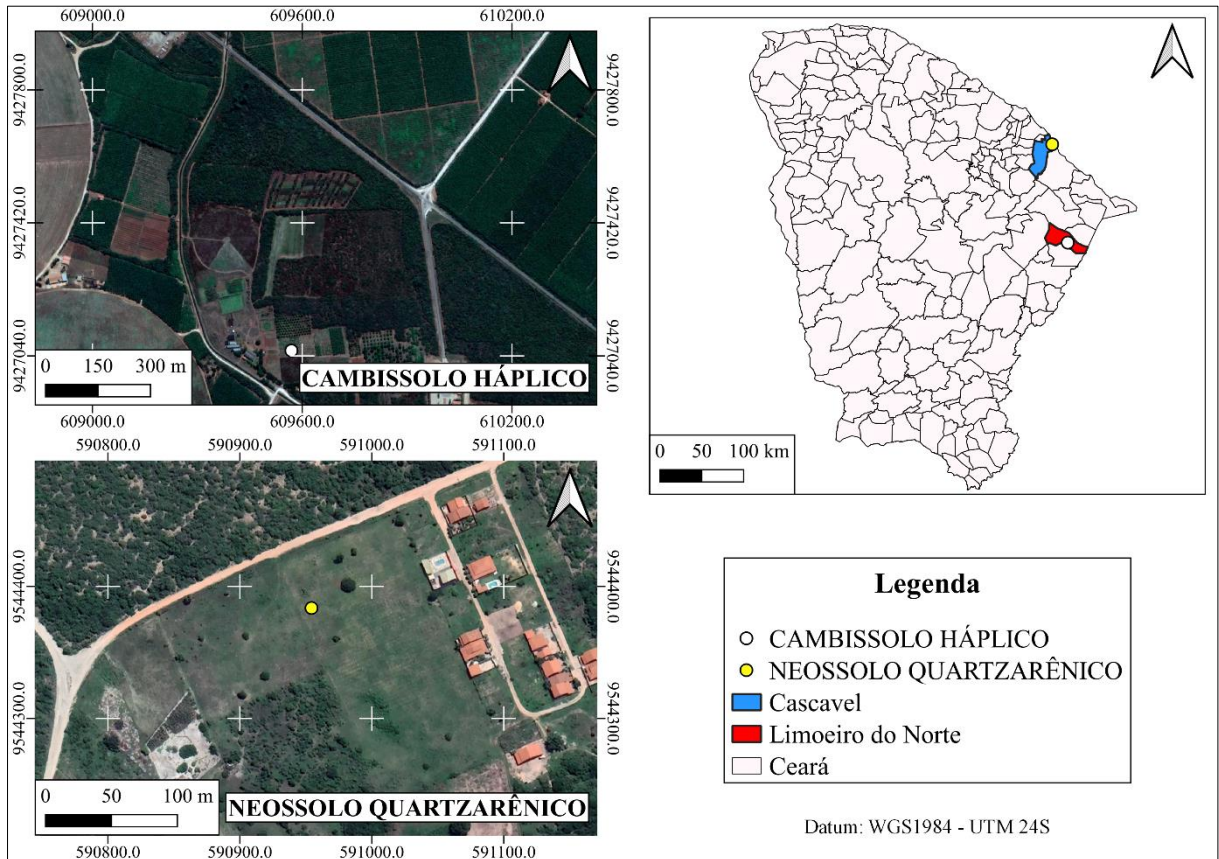


Figura 6 - Pontos de coleta das amostras do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO no município de Cascavel - CE (A) e do CAMBISSOLO HÁPLICO no município de Limoeiro do Norte-CE (B).

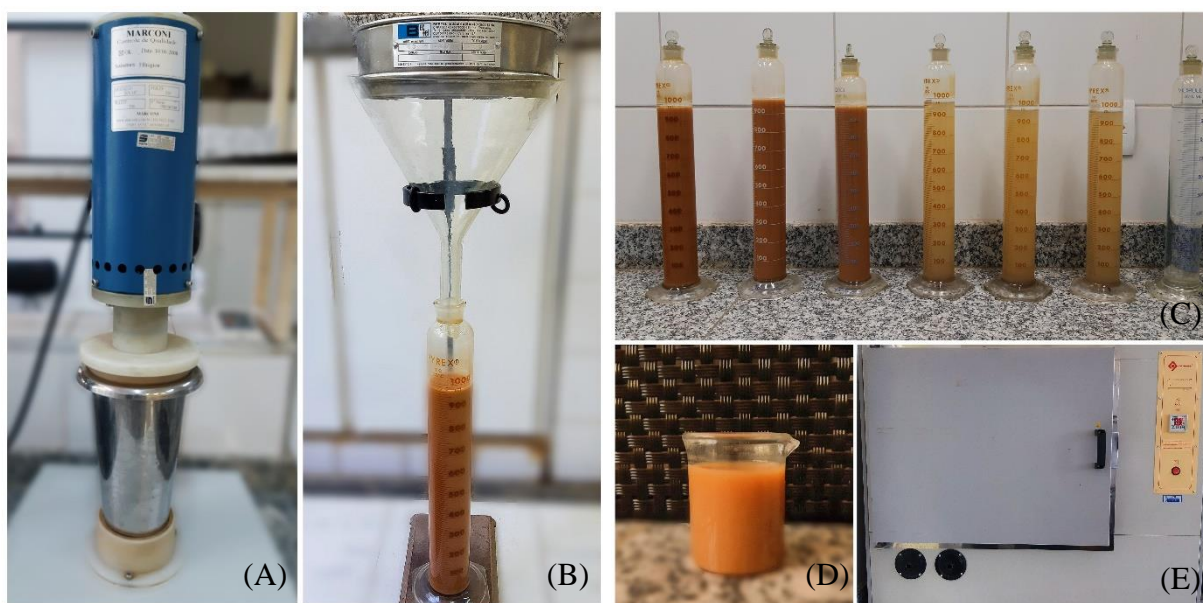


Fonte: Autora (A) e Lucas de Sousa Oliveira (B).

A análise granulométrica dos solos foi realizada a fim de obter as frações areia, silte e argila. Esta última foi obtida pelo método da pipeta (GEE; OR, 2002), em que as amostras de solo foram submetidas ao processo de dispersão química com hidróxido de sódio ($\text{NaOH } 1 \text{ mol L}^{-1}$) por 15 horas. Após esse período, foram colocadas em um agitador (Figura 7A) para que procedesse a dispersão física por 10 minutos (amostras de solo argiloso) e 5 minutos (amostras de solo arenoso).

Em seguida, as amostras passaram por uma peneira de 0,053 mm a fim de separar a fração areia (que ficou retida na peneira); as frações silte e argila foram postas em suspensão em água (Figura 7B), a qual foi agitada e medida sua temperatura para estabelecer o tempo de sedimentação, conforme a Lei de Stokes (Figura 7C), após o qual foi realizada a coleta da suspensão da fração argila (Figura 7D) e levada para estufa a 105°C até massa constante (Figura 7E). A fração areia também foi levada à estufa e a fração silte foi calculada por subtração das outras frações em relação à amostra original. Preparou-se uma amostra apenas com o dispersante e água destilada a fim de obter sua massa e subtrair do valor das amostras de argila. Os resultados das frações granulométricas estão apresentados na Tabela 1.

Figura 7 - Análise granulométrica das amostras de solo de um CAMBISSOLO HÁPLICO e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Dispersão física das frações (A); peneiramento das areias para separação das frações silte e argila (B); amostras em repouso aguardando o tempo de sedimentação das partículas de silte (C); amostra de argila coletada (D) para obtenção de massa após secar em estufa a 105°C (E).



Fonte: Autora.

Tabela 1- Análise granulométrica do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, do CAMBISSOLO HÁPLICO e da mistura de ambos.

Prof. (m)	Areia						Silte	Argila	Classe textural
	AT	AMG	AG	AM	AF	AMF			
	(g. kg ⁻¹)								
0,20- 0,40	Neossolo Quartzarênico Órtico								Areia
	965,83	0	0	48,83	516	399,17	22,30	11,87	
0,37- 0,60	Cambissolo Háptico Tb Eutrófico								Franco-argilosa
	440,83	2,67	78,83	54,17	93,83	211	253,30	305,87	
	Mistura dos solos								Franco-arenosa
							642,80	154,65 202,60	

*AT= areia total; AMG= areia muito grossa; AG= areia grossa; AM = areia média; AF= areia fina; AMF= areia muito fina

3.3 Preparo das amostras do experimento

Jamison & Kroth (1958) avaliaram 54 perfis de solos do Missouri - EUA e constataram que somente em solos com 13 a 20 % de argila, o aumento do teor de matéria orgânica resultou em mais água disponível às plantas. Então, em analogia à matéria orgânica, amostras da textura franco argilosa, com 30% de argila, foram misturadas às amostras da textura areia (1% de argila) numa proporção que atingisse o teor de 20%, para examinar o uso do carvão vegetal como condicionador de solo.

Fez-se a análise granulométrica nas misturas para confirmar a quantificação de areia e argila nas misturas e obteve-se o resultado pré-definido com êxito, finalizando, então três tratamentos controles: solo de classe textural areia (1% de argila), solo de classe textural franco arenosa (20% de argila) e solo de classe textural franco argilosa (30% de argila).

O carvão vegetal foi adicionado a cada uma dessas três classes texturais em doses de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 % (em base de volume). Como a densidade é o parâmetro de projeto mais importante para transporte e manuseio de materiais, sugere-se que o planejamento seja baseado no volume e não no peso (WEBER, QUICKER, 2018). Com isso, para o preparo das amostras do experimento, utilizaram-se amostras do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, do CAMBISSOLO HÁPLICO e do carvão vegetal proveniente de madeira de eucalipto (Figura 8).

Figura 8 - Amostras do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, do CAMBISSOLO HÁPLICO e do carvão vegetal proveniente de madeira de eucalipto.



Fonte: Autora

Após a mistura, as amostras foram acondicionadas em cilindros de PVC com 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura (Figura 9A). O acondicionamento das misturas foi feito com o auxílio de um funil de forma que preenchesse 1/3 do cilindro procedendo dez batidas a uma altura de aproximadamente 5 cm (Figura 9B), em seguida completou-se da mesma forma para 2/3 do cilindro e, por fim, completou-se o volume (Figura 9C). Após a preparação das amostras foi calculada a densidade por meio da relação massa/volume (Equação 1), com a preocupação em deixar as repetições de cada tratamento com a mesma densidade. Também foi realizada a análise de densidade de partículas (Equação 2) e a porosidade total foi calculada por meio desses dois valores (Equação 3). Por ocasião do cálculo da densidade do solo, a massa de terra fina seca ao ar (TFSA), utilizada para a montagem de cada corpo de prova, foi transformada em terra fina seca em estufa (TFSE) utilizando o fator de correção de umidade “f” ($f = TFSA/TFSE$).

Depois de preparadas, as amostras foram colocadas para saturar por 24h (Figura 9D), em seguida drenadas até a capacidade de campo (6 kPa) (Figura 9E) e levadas ao processo de incubação (Figura 9F).

Figura 9 - Unidades experimentais preparadas e acondicionadas em cilindros de PVC.



3.4 Período de incubação

Os experimentos de incubação combinados à caracterização de carvão vegetal podem fornecer informações importantes acerca dos efeitos de curto prazo da aplicação do material. As amostras permaneceram por um período de 90 dias de incubação, conforme realizado por Paetsch *et al.* (2018), Basso *et al.* (2013) e Ouyang *et al.* (2013).

Foram realizadas, então, 10 baterias, com 30 unidades experimentais cada, preparadas num intervalo de 30 dias, as quais mantiveram-se incubadas por 90 dias em sala escura e mantidas na umidade de 60% da capacidade de campo durante todo o experimento, pesando as amostras uma vez por semana e adicionando água, quando necessário. Após o término do período de incubação, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física do Solo a fim de proceder as análises.

3.5 Variáveis analisadas

As variáveis analisadas nesse trabalho foram: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade intrínseca ao ar, capacidade de campo (a qual foi considerada o mesmo valor de umidade da microporosidade por questões práticas),

ponto de murcha permanente, capacidade de armazenagem de água e condutividade hidráulica saturada.

A densidade do solo (ρ_s) foi determinada pelo método do cilindro volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002), com base na equação 1:

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (1)$$

em que:

ρ_s – densidade do solo em g cm^{-3}

m – massa do solo seco em g

V – volume do cilindro em cm^3 .

Para que fosse possível obter o valor da porosidade total foi necessário determinar a densidade de partículas (ρ_p) realizada pelo método do balão volumétrico (50 mL), utilizando álcool etílico como líquido penetrante com base na equação 2:

$$\rho_p = \frac{a}{(50-b)}$$

(2)

em que:

ρ_p – densidade de partículas em g. cm^{-3}

a – massa da amostra seca a $105\text{ }^\circ\text{C}$ em g

b – volume de álcool gasto em cm^{-3}

A porosidade total (α) foi obtida, então, em função dos valores das densidades das amostras e das partículas pela seguinte equação 3:

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}$$

(3)

em que:

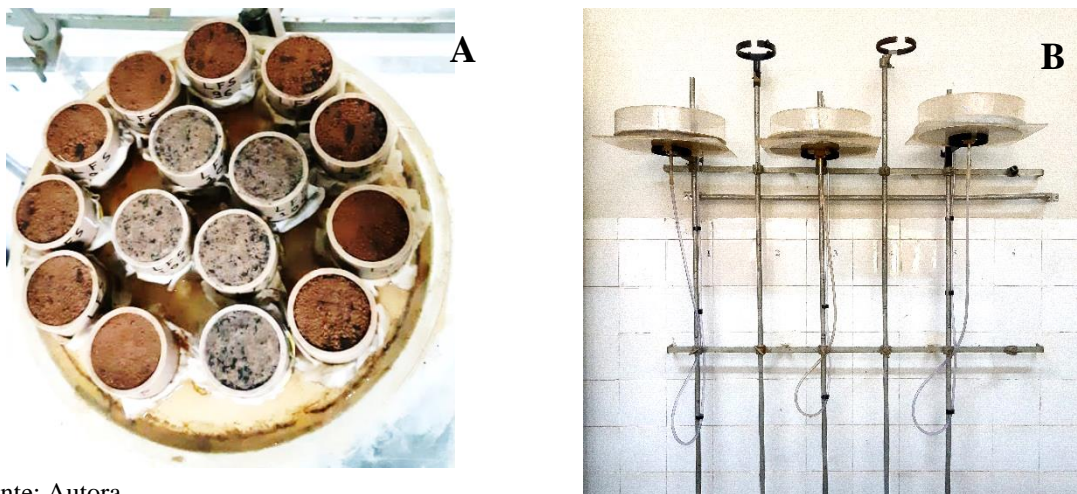
α – porosidade total calculada ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

ρ_s – densidade do solo em g cm^{-3} .

ρ_p – densidade das partículas em g cm^{-3} .

A microporosidade das amostras ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) foi determinada pelo método da mesa de tensão (Foto 10) a 6 kPa (OLIVEIRA, 1968) e, neste trabalho, considerou-se também esse valor para a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), a qual se dá quando a água é drenada por força da gravidade e todos os macroporos ficam vazios. A macroporosidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) foi obtida pela diferença entre a porosidade total (Equação 3) e a microporosidade.

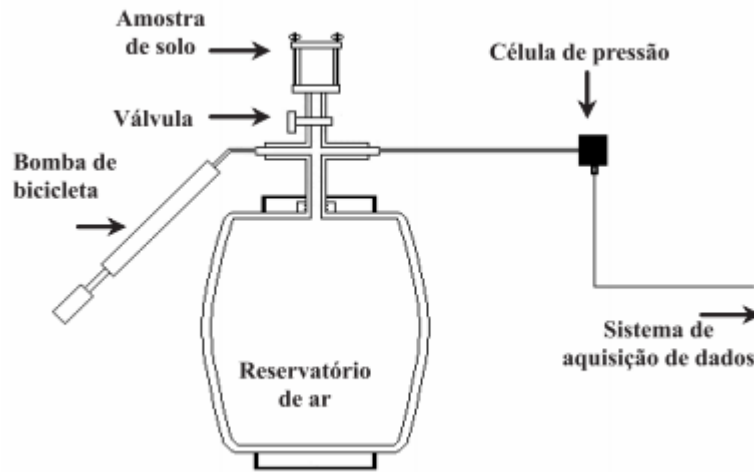
Figura 10 - Amostras saturadas em placa porosa (A) submetidas a -6 kPa na mesa de tensão (B).



Fonte: Autora.

Após as amostras entrarem em equilíbrio na tensão de -6 kPa para o cálculo da capacidade de campo, mensurou-se suas massas e então foi realizada a determinação da permeabilidade do solo segundo o método da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946; SILVEIRA *et al.*, 2011). As amostras foram fixadas no tubo de saída de ar do reservatório e por elas se fizeram passar uma quantidade de ar equivalente a uma pressão de 1 kPa (Figura 11). Com a utilização do software Permeary.1.0 (SILVEIRA *et al.*, 2011) foi registrado, de modo eletrônico, o decaimento da pressão com o tempo, e posteriormente obtenção do coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}).

Figura 11 - Instrumento utilizado para medir a permeabilidade ao ar de amostras de solo.



Fonte: Silva et. al (2009)

A equação 4 foi utilizada para estimar a K_{ar} :

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{A \times P_{atm}} \times |S| \quad (4)$$

em que:

K_{ar} = coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2);

V = volume de ar que passa pelo cilindro (m^3);

η = viscosidade dinâmica do ar (Pa. s);

L = altura do anel volumétrico (m);

A = igual a área da secção transversal da amostra de solo (m^2);

P_{atm} = pressão atmosférica local (Pa);

S = coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

Ao fim dessa análise, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C até obter massa constante, para a determinação da umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$).

O índice de continuidade de poros $K1$ também foi calculado por meio da relação da permeabilidade intrínseca do ar (K_{ar}) e porosidade de aeração (ϵ_a), conforme Groenevelt et al. (1984). A porosidade de aeração foi considerada como a macroporosidade.

$$K1 = \frac{K_{ar}}{\epsilon_a} \quad (5)$$

O estado de umedecimento mais comum do solo agrícola é o da não saturação, porém nesse caso a quantificação do movimento da água dentro do solo torna-se bem mais complexa do que para solos saturados (AMARO FILHO *et al.*, 2008). Por questões práticas, em laboratório faz-se a análise da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}).

Para determinação da condutividade hidráulica, as amostras com estrutura preservada foram saturadas em uma bandeja com água com $2/3$ da altura do cilindro, durante 24 horas. Para a análise, foi utilizado permeâmetro de carga constante (Figura 12) seguindo metodologia empregada por YOUNGS, 1991), a qual faz uso da equação de Darcy para determinação da condutividade hidráulica saturada do solo. A partir da equação de Darcy pode-se calcular a condutividade hidráulica por:

$$K_0 = \frac{Q \times L}{A \times X (L+h)} \quad (6)$$

em que:

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

Q = vazão que passa pela amostra ($\text{mm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

L = comprimento da amostra medido no sentido do fluxo (mm);

A = Área de seção transversal da amostra (mm^2);

h – altura da lâmina de água sobre a amostra (mm).

Figura 12 - Esquema para análise da condutividade hidráulica saturada em permeâmetro de carga constante.

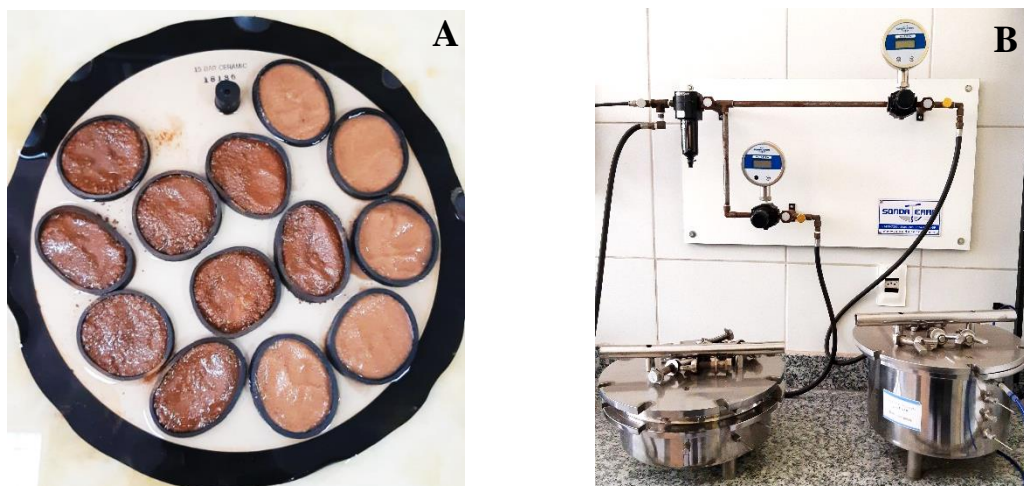


Fonte: Autora

Para determinar a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porções das amostras foram dispostas em anéis de borracha e submetidas à tensão de 1500 kPa em extrator

de placa porosa de Richards (RICHARDS, 1949) para estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e a umidade (Figura 13).

Figura 13 - Amostras saturadas em placa porosa (A) submetidas à tensão de 1.500 kPa em câmara de Richards (B).



Fonte: Autora

A capacidade de água disponível (CAD), que considera disponível para as plantas a água retida entre a umidade na capacidade de campo (CC) e umidade no ponto de murcha permanente (PMP), foi calculada pela diferença dos valores da umidade dessas duas variáveis:

$$CAD = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (7)$$

3.6 Análise estatística dos dados

O delineamento utilizado foi o inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 3 (classes texturais de solo) x 7 (doses de carvão vegetal) com 5 repetições, totalizando 120 unidades experimentais (105 unidades dos solos com carvão vegetal + 15 unidades dos tratamentos controles, ou seja, amostras de solos sem adição do carvão vegetal).

Os dados foram submetidos a teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação de médias e, além disso, as doses de carvão vegetal foram analisadas por meio de regressão polinomial no software estatístico SISVAR.

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de teste de Kolmogorov-Smirnov e os dados que não seguiram a distribuição normal foram transformados utilizando o procedimento descrito por Box e Cox (1984).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física do carvão vegetal

O carvão vegetal proveniente de eucalipto foi caracterizado em função dos atributos físicos, como distribuição por tamanho de partículas, densidade e capacidade de retenção de água (Tabela 2); e área superficial específica, diâmetro médio dos poros e volume total de poros (Tabela 3).

Tabela 2 - Caracterização física do carvão vegetal proveniente de eucalipto

Granulometria do carvão vegetal (%)				
8 – 4,76 mm	4,76 - 2 mm	2 – 1 mm	1 – 0,5 mm	< 0,5 mm
20,13	39,37	15,57	9,90	15,03
Densidade do carvão vegetal (g. cm⁻³)				
0,34				
Capacidade de retenção de água do carvão vegetal (g. g⁻¹)*				
1,11				

*Usei aqui, exclusivamente, a unidade em base de massa para mostrar que o carvão vegetal tem a capacidade de reter água além do seu peso.

O carvão vegetal exibiu uma alta capacidade de retenção de água, retendo mais água do que seu próprio peso (1,11 g. g⁻¹). Esse resultado equiparou-se com o de Tanure *et al.* (2019) que encontraram valores de umidade entre 1,03 e 1,40 g g⁻¹ à tensão de -6 KPa nos biocarvões analisados.

A área superficial específica (ASE) do carvão vegetal apresentou valor de 18,57 m² g⁻¹ (Tabela 3), intrínseca a biocarvões provenientes de pirólise realizadas a baixa temperatura, os quais possuem uma menor ASE, comparado aos produzidos em temperaturas mais altas. Sun *et al.* (2013b), também ao analisar carvão vegetal de eucalipto pirolisado a 400° C, encontraram ASE de 10,35 m² g⁻¹. Keiluweit *et al.* (2010), ao comparar a ASE em biocarvão de madeira de pinheiro em função da temperatura de pirólise, verificou que os valores aumentaram de 28,7 m² g⁻¹ para 196 m² g⁻¹ e 392 m² g⁻¹ quando a temperatura de pirólise variou de 400 °C para 500 °C e 600 °C, respectivamente. O trabalho de Chaves Fernandes *et al.* (2020) ratifica isso, pois apresenta em estudo que o biocarvão de eucalipto pirolisado a 650°C exibiu ASE do de 410,48 m² g⁻¹.

Tabela 3 - Área superficial específica, diâmetro médio dos poros e volume total de poros do carvão vegetal de eucalipto a partir das isotermas de adsorção-dessorção de N₂ (método BET).

Área superficial específica	Diâmetro médio de poros	Volume total de poros
18,5750 m ² g ⁻¹	9,6122 nm	0,0446 cm ³ g ⁻¹

Ademais, o carvão vegetal apresentou o diâmetro médio de poros de 9,6 nm, característico de mesoporos (poros com diâmetro entre 2 nm e 50 nm), os quais estão relacionados com os processos de adsorção sólido-líquido (Downie *et al.*, 2009) e o volume total de poros foi 0,0446 cm³ g⁻¹. Resultados semelhantes foram apresentados por Suárez-Hernández *et al.* (2017) quando caracterizaram biocarvão proveniente de eucalipto e encontraram diâmetro médio de poros de 5,3 nm (mesoporos) e volume de poros, 0,040 cm³ g⁻¹, respectivamente.

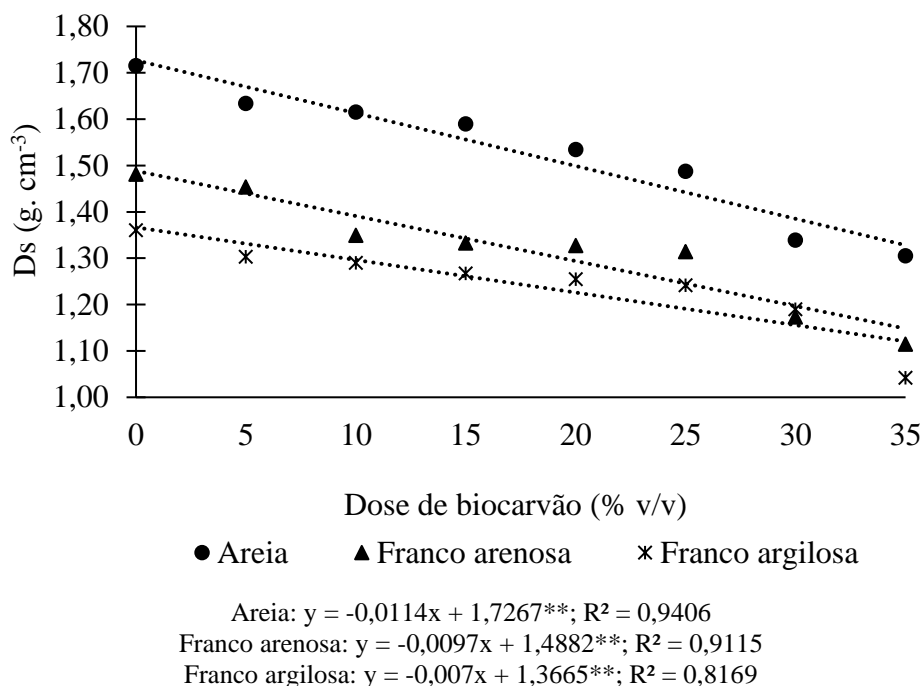
4.2 Atributos físicos relacionados ao ar do solo alterados com a adição do carvão vegetal

As texturas dos solos, as doses do carvão vegetal e as suas respectivas interações foram significativas para densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma) e permeabilidade intrínseca ao ar (Kar), como pode ser visto na tabela da Análise de Variância (Apêndice A).

4.2.1 Densidade do solo (Ds)

A densidade do solo (Ds) apresentou redução de forma linear para os três solos estudados e diminuiu à medida que aumentou a dose de carvão vegetal (Figura 14): a Ds da classe textural areia foi reduzida em 23,92%; da franco arenosa, 24,77%; e da franco argilosa, em 23,40% com a maior aplicação de carvão vegetal. A redução da densidade ocorre tanto em função do efeito direto, devido ao aumento da porosidade oriunda do carvão vegetal, quanto do efeito indireto, ocasionado pela mistura desse material cuja densidade é muito baixa. Foi constatado por Alghamdi (2018) que o aumento na taxa de aplicação de biocarvão leva à diminuição na densidade do solo independente da sua classe textural.

Figura 14 - Densidade do solo (D_s) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



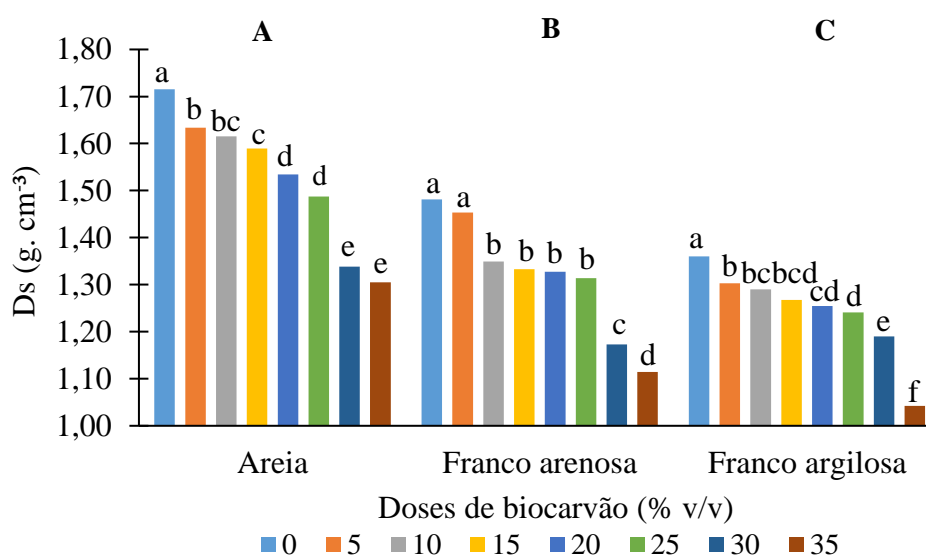
Duarte *et al.* (2019) também verificaram que a densidade do solo diminuiu com o aumento do biocarvão, a qual variou de $1,46 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ no solo argiloso e de $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ para solo arenoso – quando aplicaram 25 Mg ha^{-1} (equivalente à dose de 5% do presente estudo) e compararam com o tratamento controle. Neste estudo, a densidade variou de $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ no solo franco argiloso e de $1,72 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,63 \text{ g cm}^{-3}$ na areia, ou seja, os autores encontraram uma variação de $0,7 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo argiloso, enquanto no presente trabalho variou $0,6 \text{ g cm}^{-3}$; e em ambos os estudos houve variação de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo arenoso.

Ao analisar a Figura 15, pôde-se observar que na areia, desde a dose mínima (5%), houve diminuição da densidade em comparação ao tratamento controle, sendo que as maiores doses (30% e 35%) promoveram a maior redução.

Já no franco arenoso, a redução da densidade ocorreu somente a partir da aplicação de 10% de carvão vegetal — a qual foi estatisticamente igual até a dose de 25% — e a dose máxima (35%) causou o menor valor de densidade do solo. Esse comportamento foi bastante semelhante no franco argiloso, o qual diferenciou apenas na redução inicial que

ocorreu logo com o uso da dose mínima (5%). Apesar dos três solos apresentarem redução linear na densidade do solo, eles ainda se mostraram estatisticamente diferentes.

Figura 15 - Densidade do solo (D_s) dos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.

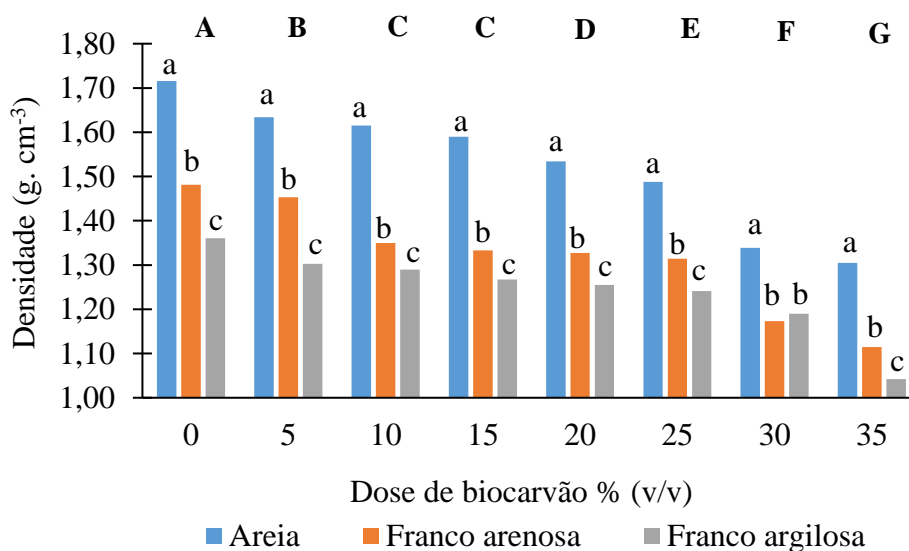


Reinert e Reichert (2006) afirmaram que valores de D_s associados ao estado de compactação com alta probabilidade de oferecer riscos de restrição ao crescimento radicular situam-se em torno de $1,65\ g\ cm^{-3}$ para solos arenosos. Portanto, a redução da densidade no solo arenoso com a adição do carvão vegetal, desde a mínima dose, contribuiu para que esse solo atingisse valor que não cause restrição às raízes das plantas.

Neste estudo, mediante a aplicação de carvão vegetal, as médias dos valores de densidade do solo variaram entre $1,11$ e $1,45\ g\ cm^{-3}$ para a textura franco arenosa; e $1,04$ e $1,30\ g\ cm^{-3}$ para a textura franco argilosa. Reynolds *et al.* (2008), em estudo visando avaliar a qualidade física de um solo franco argiloso, afirmaram que valores de densidade do solo entre $1,10$ e $1,23\ Mg\ m^{-3}$ são considerados como ótimos para atingir os rendimentos máximos das plantas cultivadas. Com isso, a dose de 30% de carvão vegetal aplicada aos solos franco arenoso e franco argiloso, resulta em valores de densidade do solo de $1,17$ e $1,19\ g\ cm^{-3}$, respectivamente, que atendem o critério anteriormente citado (Figura 16).

Solos com menor densidade proporcionam melhor circulação de gases e água – o que é essencial para o desenvolvimento radicular das plantas (CHAMEN *et al.*, 2015). Dessa forma, a adição de carvão vegetal resulta em melhoria da função agrônômica dos solos estudados. Portanto, é interessante considerar o uso desse condicionador de solo.

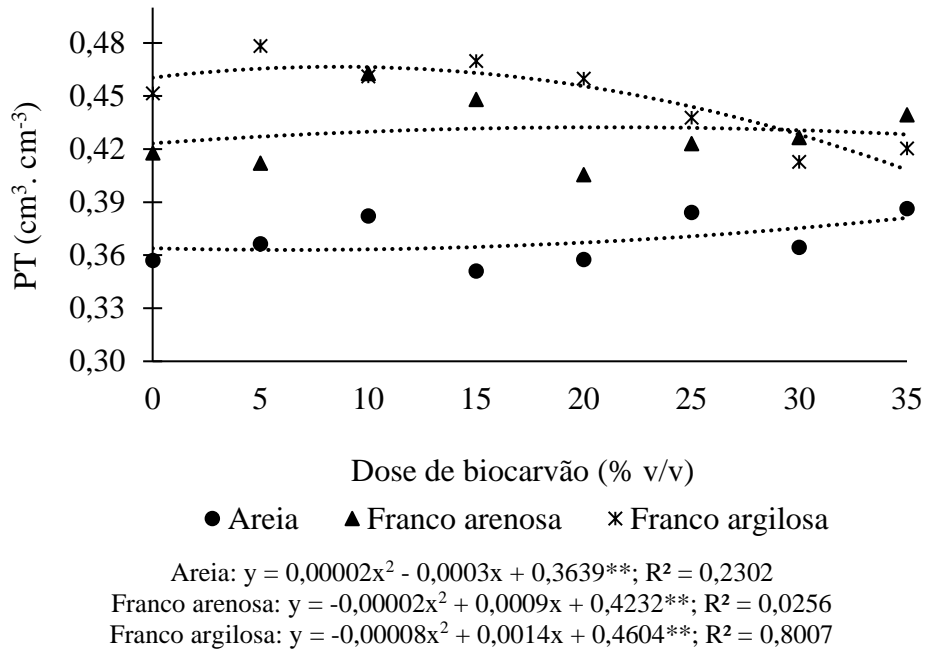
Figura 16 - Densidade do solo (Ds) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as classes texturais e letras maiúsculas entre as doses.



4.2.2 Porosidade total do solo (PT)

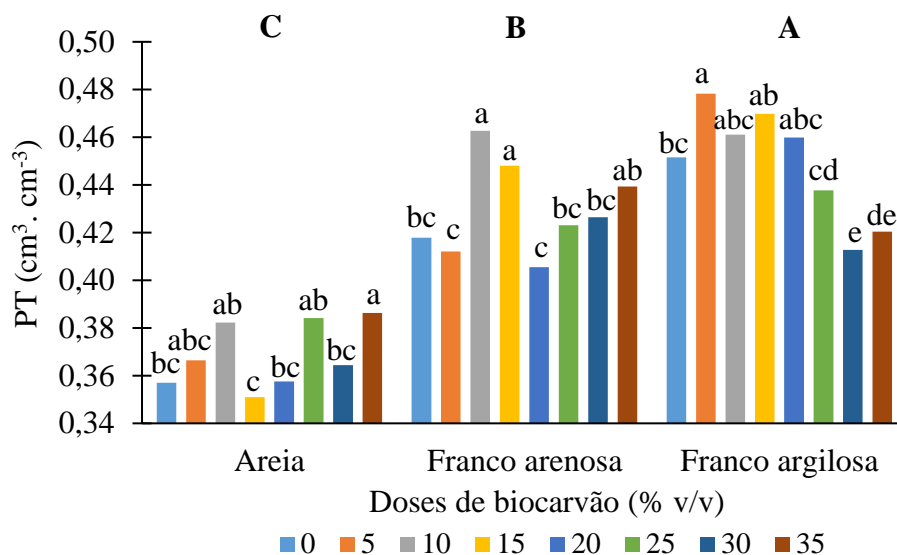
A porosidade total do solo (PT) apresentou tendência de aumento nas texturas arenosa e franco arenosa. Já na franco argilosa, ocorreu o inverso: houve tendência de diminuição (Figura 17). Geralmente, o carvão vegetal contribui para o aumento da porosidade total, entretanto, Wong *et al.* (2018) relataram diminuição na porosidade total em corpos de prova confeccionados com caulinita, com aplicação de biocarvão, e constataram que isso ocorreu devido ao aprisionamento de partículas de argila nos poros do biocarvão – com consequente redução da porosidade total.

Figura 17 - Porosidade total do solo em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



Na Figura 18 são apresentados os resultados estatísticos referentes à PT para os solos estudados e as doses aplicadas. Apenas a maior dose de carvão vegetal (35%) causou aumento na PT do solo arenoso a ponto de resultar em diferença em relação ao tratamento controle. No solo franco arenoso, as doses 10% e 15% provocaram aumento significativo da PT. Também vale destacar que as demais doses (5%, 20%, 25%, 30% e 35%) não diferiram do tratamento controle. Já para o solo franco argiloso, o maior aumento da PT foi observado na dose de 5%. Ressalta-se ainda que, nesse mesmo solo, as maiores doses (30 e 35%) resultaram em redução da PT para um patamar inferior ao tratamento controle.

Figura 18 - Porosidade Total (PT) dos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.



De maneira geral, a PT do solo varia entre 0,30 e 0,70 cm³. cm⁻³ (FERREIRA, 2010). Logo, os três solos, em todas as doses utilizadas, apresentaram valores de PT dentro desse intervalo. Com a aplicação de carvão vegetal, a PT variou entre 0,35 e 0,39 cm³. cm⁻³ na areia; entre 0,42 e 0,46 cm³. cm⁻³ na franco arenosa; e entre, 0,41 a 0,48 cm³. cm⁻³ na franco argilosa.

Embora existam estudos mostrando aumento de mais de 10% na PT mediante a aplicação de biocarvão, a meta-análise realizada por Omondi *et al.* (2016) demonstrou que a variável aumentou em menos de 10% na maioria dos estudos – numa média de 8,4%. No mesmo estudo, ao considerar a textura do solo, observou-se que a PT aumentou significativamente em 7,5% em solos de textura grossa; e 7,1% em solos de textura fina. Já Duarte *et al.* (2019) relataram aumento na PT de 3% em solo arenoso e 2% em solo argiloso. Na meta-análise realizada por Edeh *et al.* (2020), independentemente do tipo de solo, a aplicação do biocarvão aumentou, em média, 9,1% da porosidade total.

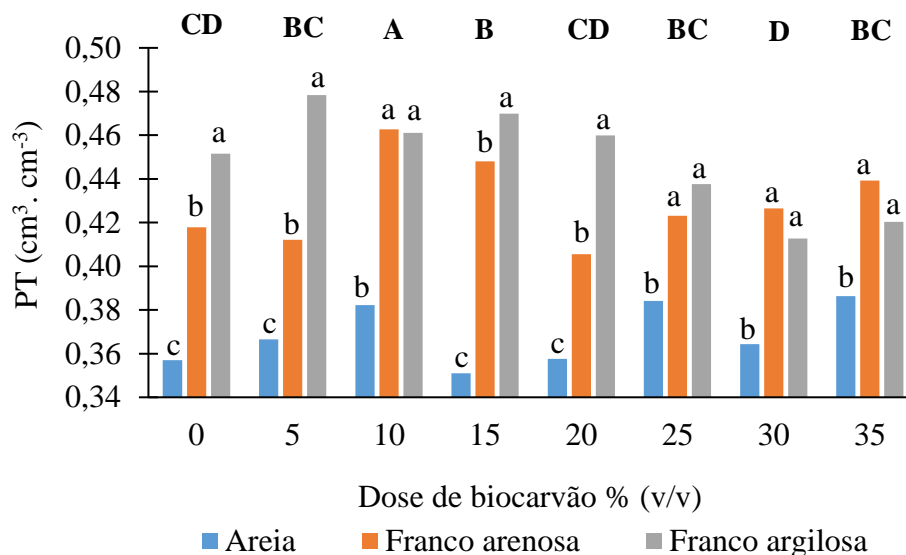
No presente estudo, no caso da PT, observou-se, na dose máxima efetiva (10%), aumento de 7,0% na textura areia – assemelhando-se aos resultados de Omondi *et al.* (2016); 10,7% na textura franco arenosa; e 2,1 % na textura franco argilosa – assim como em Duarte *et al.* (2019). O aumento de apenas 2% na franco argilosa pode ser explicado pelo fato dele já apresentar uma alta microporosidade (0,3606 cm³. cm⁻³) a qual é responsável,

majoritariamente, pela porosidade total – o que não torna o efeito do carvão vegetal tão expressivo.

Ao observar a influência das doses nas modificações na porosidade total do solo (Figura 19), concluiu-se que a dose de 10% foi a que teve maior impacto na melhoria desse atributo. Inclusive, na dose de 10%, os valores de PT dos solos de classe textural franco arenosa e franco argilosa foram estatisticamente iguais. Portanto, a adição de carvão vegetal em 10%, nos três solos, foi considerada como dose máxima efetiva a fim de contribuir para a porosidade total do solo, sendo desnecessário o uso de maiores doses.

Além disso, notou-se que as texturas franco arenosa e franco argilosa exibiram mesmo comportamento quando da aplicação de 25% ou mais de carvão vegetal. Isto significa que as alterações na PT causadas pelo condicionador, em doses iguais ou superiores a 25%, não são perceptíveis em solos cujo teor de argila é superior a 200 g. kg⁻¹.

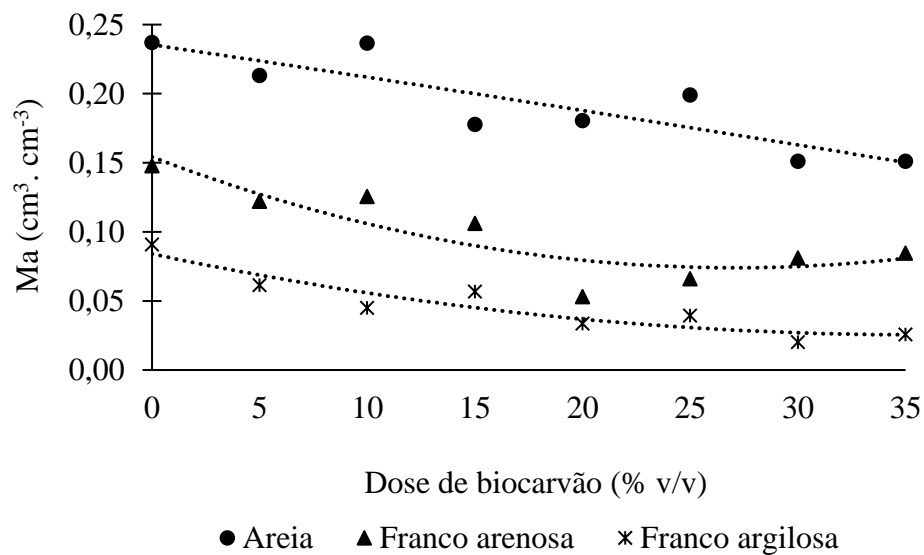
Figura 19 - Porosidade total do solo em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as classes texturais e letras maiúsculas entre as doses.



4.2.3 Macroporosidade (Ma) e Microporosidade (Mi) do solo

A macroporosidade foi reduzida em todas as classes texturais com a aplicação do carvão vegetal (Figura 20), apresentando reduções máximas de 36,2%, 64,1% e 77,8% para os solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa, respectivamente.

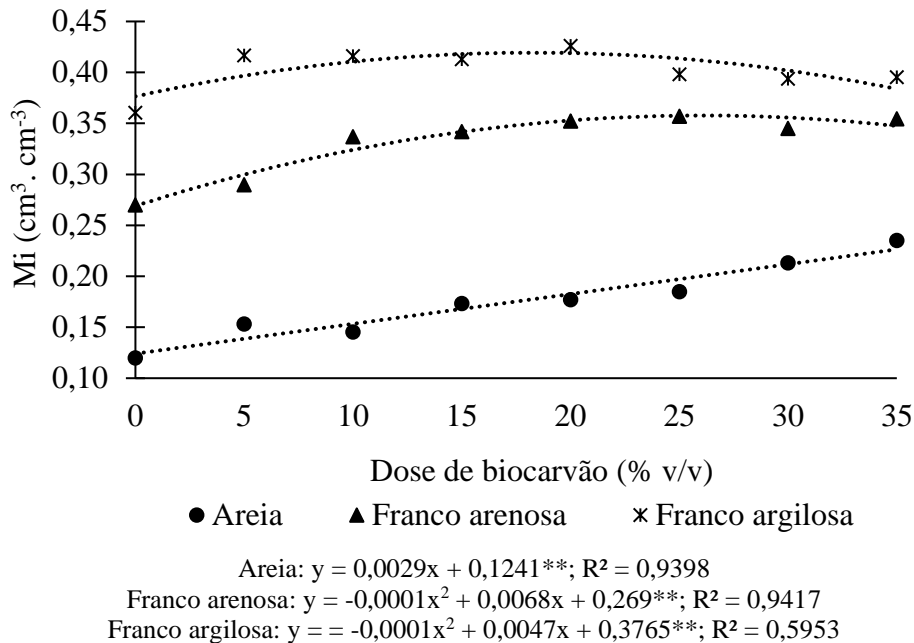
Figura 20 - Macroporosidade do solo (Ma) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade e (ns) indicam não significativo.



Areia: $y = -0,000004x^2 - 0,0023x + 0,2354^{ns}$; $R^2 = 0,7591$
 Franco arenosa: $y = 0,0001x^2 - 0,0059x + 0,1542^{**}$; $R^2 = 0,7924$
 Franco argilosa: $y = 0,000004x^2 - 0,0032x + 0,0839^{ns}$; $R^2 = 0,8663$

A redução da macroporosidade coincide com o aumento da microporosidade (Figura 21), fato que provavelmente está relacionado com a ocupação de parte dos macroporos do solo pelas partículas finas do carvão vegetal, convertendo esses macroporos em microporos (LIMA, 2016).

Figura 21- Microporosidade do solo (Mi) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



Os dados de redução relativa na macroporosidade contêm a seguinte lógica: como a macroporosidade é alta nos solos de classe textural arenosa, as variações relativas (percentuais) nesses solos são bem menores do que aquelas que ocorrem em solos de textura argilosa, nos quais a quantidade de macroporos é naturalmente menor, e, como consequência, as variações nominais na macroporosidade provocam variações relativas bem maiores.

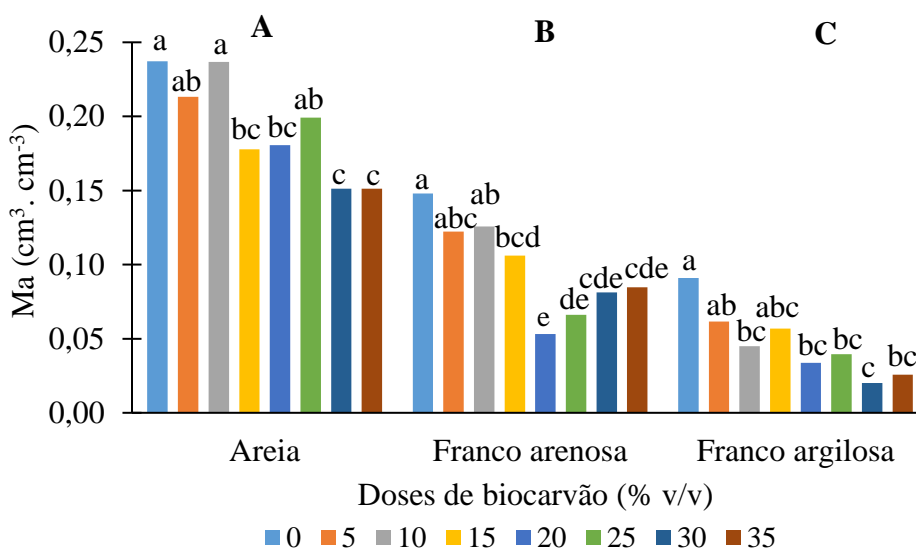
A Figura 20 revela que: a maior variação nominal nos valores de macroporosidade no solo de textura arenosa ($0,0860 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) resultou em variação relativa de apenas 36,2%, enquanto a menor variação no solo de textura franco argilosa ($0,065 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) provocou uma queda relativa na macroporosidade da ordem de 77,8%. Isso se confirma também para a ocorrência no solo de textura franco arenosa, no qual verificou-se a mesma diminuição nominal do solo de textura franco argilosa ($0,065 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), mas com queda relativa ligeiramente menor, 64,1%.

Ao observar a Figura 22, verificou-se que, na areia, o uso do carvão vegetal resultou em diferença estatística em comparação ao controle a partir da dose 15%, sendo que as maiores doses (30% e 35%) resultaram em valores idênticos e apresentaram os menores valores de macroporosidade. O solo franco arenoso também exibiu comportamento diferente do tratamento controle com a aplicação de 15% de carvão vegetal. Já a dose de 20% de carvão

vegetal proporcionou a maior redução da Ma, apesar de não diferenciar estatisticamente das doses superiores.

Já o solo de textura franco argilosa, antes mesmo das adições do carvão vegetal, já apresentava valor de macroporosidade no limite para uma boa aeração do solo (10%), segundo Grable e Siemer (1968). À medida que se aumentou as doses do carvão vegetal, a macroporosidade foi reduzida gradualmente até um patamar cinco vezes menor o valor de referência (controle). Esse efeito foi mais pronunciado nas doses de 30 e 35%.

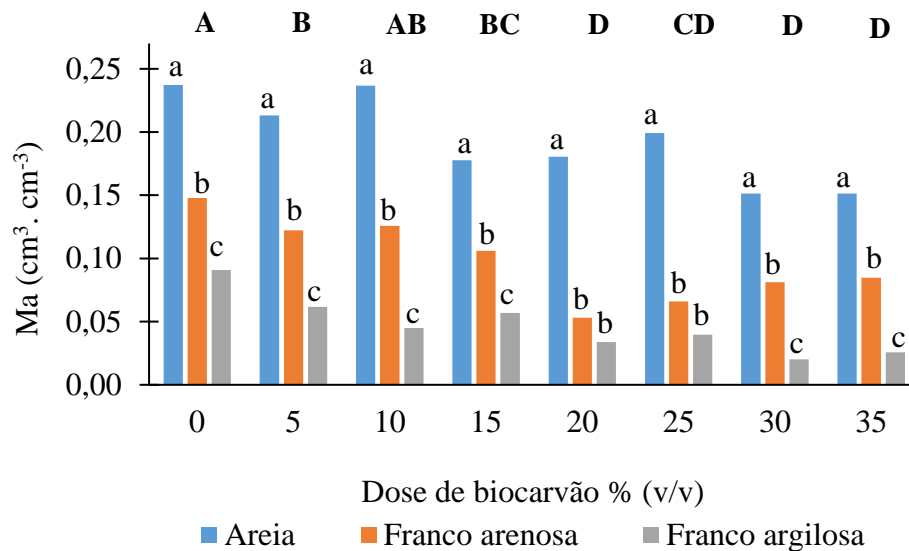
Figura 22 - Macroporosidade (Ma) dos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.



Silva *et al.* (2020), ao avaliarem os efeitos de diferentes porosidades de aeração sobre o crescimento do milho, verificaram que valores entre 7 e 10% não resultaram em impedimento ao desenvolvimento das plantas. Já para Reynolds *et al.* (2008), o intervalo de macroporosidade ideal para cultivo é entre 9 e 13%. Ao considerar esses valores de referência para o solo franco argiloso, desde a aplicação da dose mínima, o uso de carvão vegetal provocou redução tal na macroporosidade que culminaria em impedimento ao desenvolvimento de plantas. Já para o solo franco arenoso, o carvão vegetal poderia ser aplicado a uma dose máxima de 15% (Figura 22).

Em contrapartida, para o solo de textura arenosa, mesmo com a dose máxima de carvão vegetal, a macroporosidade não reduziu a ponto de ficar abaixo do limite inferior de porosidade de aeração, apresentando valor de 15,13% (Figura 23) – sendo até mais adequado ao cultivo (por diminuir porosidade de drenagem e aumentar porosidade de retenção de água) do que o solo sem carvão vegetal.

Figura 23 - Macroporosidade do solo (Ma) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os as classes texturais e letras maiúsculas entre doses.



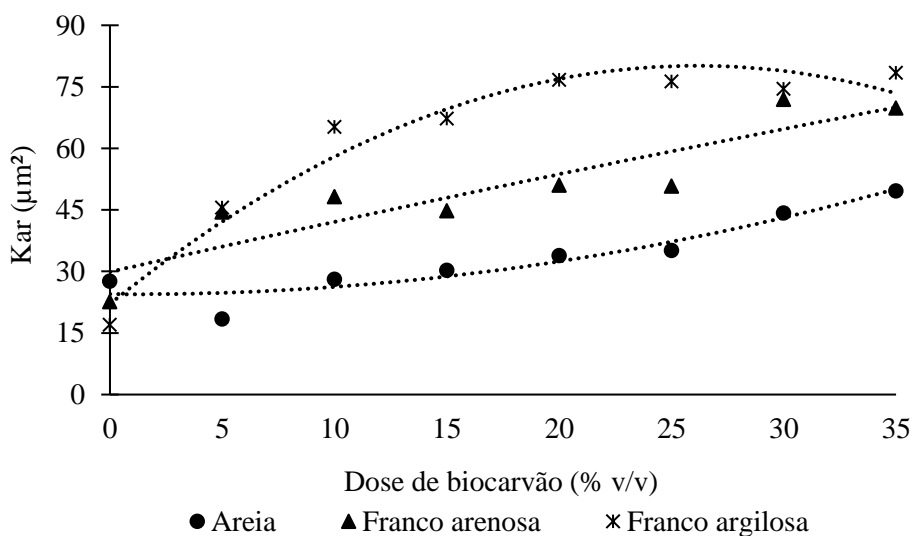
Por fim, é oportuno fazer as seguintes inferências: em solos que continham teor de argila acima de 200 g. kg⁻¹, a aplicação de carvão vegetal resulta em acentuada redução da macroporosidade (Figura 20) – que já representa menor fração da porosidade total em detrimento da microporosidade (Figura 21). Isso ocorre devido à deposição de partículas finas de carvão vegetal, o que resulta em redução do diâmetro e, talvez, obstrução dos macroporos.

Diante disso, antes de optar pelo uso desse condicionador, sugere-se avaliar a macroporosidade do solo e ponderar sobre o custo/benefício da aplicação, isto é, se a redução na fração de macroporos, com consequentes prejuízos em termos de aeração e drenagem, é válido frente aos outros benefícios acarretados pelo carvão vegetal.

4.2.4 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar)

A permeabilidade do solo ao ar (Kar) apresentou tendência de aumento para os três solos à medida que se aumentou a dose de carvão vegetal (Figura 24), com aumentos máximos em 79,4% para o solo de textura arenosa; 217,7% para o solo de textura franco arenosa; e 360,8% para o solo de textura franco argilosa. Ressalta-se ainda que, para todas as classes texturais e doses de carvão vegetal avaliadas, os valores de Kar foram superiores a $1\mu\text{m}^2$ – limiar abaixo do qual o fluxo convectivo de gases no solo cessa (MCQUEEN; SHEPHERD, 2002).

Figura 24 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



$$\text{Areia: } y = 0,0233x^2 - 0,1389x + 26,1853^{\text{ns}}; R^2 = 0,9623$$

$$\text{Franco arenosa: } y = -0,0029x^2 + 1,2488x + 29,897^{**}; R^2 = 0,8196$$

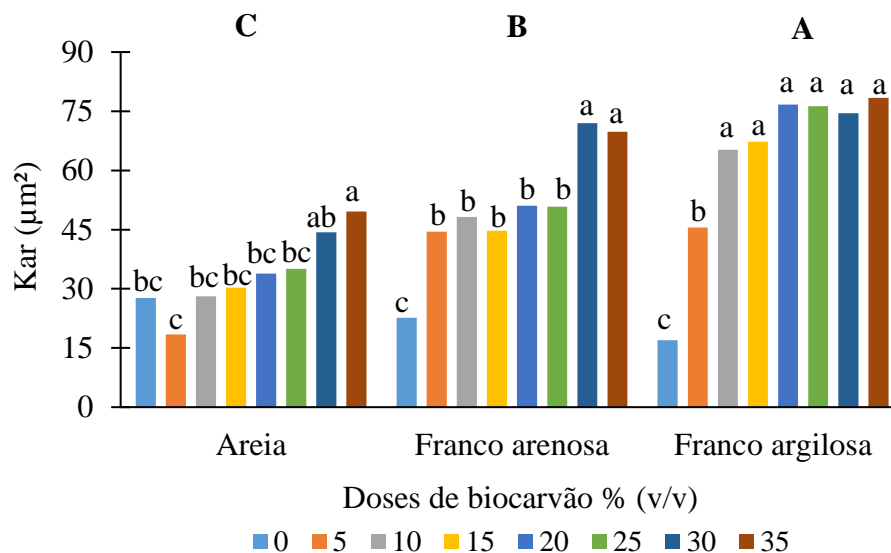
$$\text{Franco argilosa: } y = -0,085x^2 + 4,4432x + 22,046^{\text{ns}}; R^2 = 0,9520$$

Pranagal e Kraska (2020) constataram o efeito do carvão vegetal no aumento da permeabilidade ao ar em solo de textura franco arenosa, o qual permaneceu visível por oito anos de experimento. Os autores relacionaram esse resultado à porosidade estrutural (entre agregados) disponível à aeração. Entretanto, a análise anterior é simplista, uma vez que os fenômenos de difusão gasosa também dependem da continuidade da rede porosa, isto é, que

um maior número de poros participe do processo de aeração (SILVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2012).

Dessa forma, pode-se inferir que, apesar da diminuição da macroporosidade proporcionada pela aplicação de carvão vegetal (Figura 20), especialmente nas maiores doses, o incremento de Kar pode ser creditado ao fato de que os poros do solo passaram a integrar uma rede mais conectada.

Figura 25 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar) dos solos arenoso, franco arenoso e franco argiloso em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre os solos.

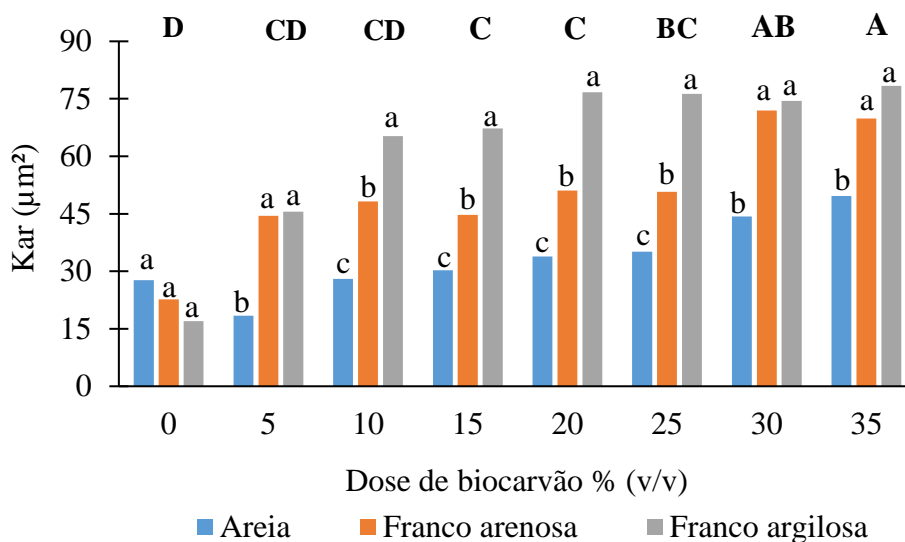


No solo de textura franco arenosa, todos os tratamentos se mostraram superiores ao tratamento controle, porém, as maiores doses (30% e 35%) foram as que proporcionaram maiores valores de permeabilidade, igualando-se, inclusive, ao solo franco argiloso com esses mesmos tratamentos (Figura 26). Sun *et al.* (2013a) confirmaram em seu estudo que a aplicação de carvão vegetal pode aumentar a permeabilidade ao ar de solo franco arenoso devido à sua elevada porosidade. Zheng *et al.* (2019), ao avaliar atributos físicos de um Alfisol mediante a aplicação de biocarvão na taxa de 1,5 t. ha⁻¹, encontraram que a porosidade total e o coeficiente de permeabilidade ao ar do solo aumentaram em 10,2% e 70,2%, respectivamente, em comparação com o tratamento controle.

O solo de textura franco argilosa também respondeu à aplicação de carvão vegetal desde a dose mínima (5%), entretanto, a partir da dose de 10%, não houve incremento significativo em Kar (Figura 26). Portanto, doses acima de 10% não implicam em incremento de Kar em solos cujo teor de argila é superior a 300 g. kg⁻¹. Essa ocorrência advém do fato de solos argilosos produzirem – naturalmente – macroporosidade mais contínua que solos arenosos. Após o ajuste conferido pela dose de 10%, nenhuma alteração na permeabilidade do solo ao ar foi possível, pelo uso do carvão vegetal, além daquela já proporcionada pela própria estruturação das argilas.

A contribuição do carvão vegetal utilizado nesse trabalho à permeabilidade intrínseca do solo ao ar a partir da dose 30% mostrou-se igual para os solos franco arenoso e franco argiloso, constatando que o uso de carvão vegetal nessa dose, em solos cujo teor de argila é superior a 200 g. kg⁻¹ de argila, não produz efeito (Figura 26).

Figura 26 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (Kar) em função das doses de carvão vegetal aplicadas solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os as classes texturais e letras maiúsculas entre doses.



4.3 Atributos hídricos do solo alterados com a adição do carvão vegetal

As classes texturais do solo, as doses do carvão vegetal e as suas respectivas interações foram significativos para capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de armazenagem de água (CAD) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}). como mostra a tabela da Análise de Variância (Apêndice A).

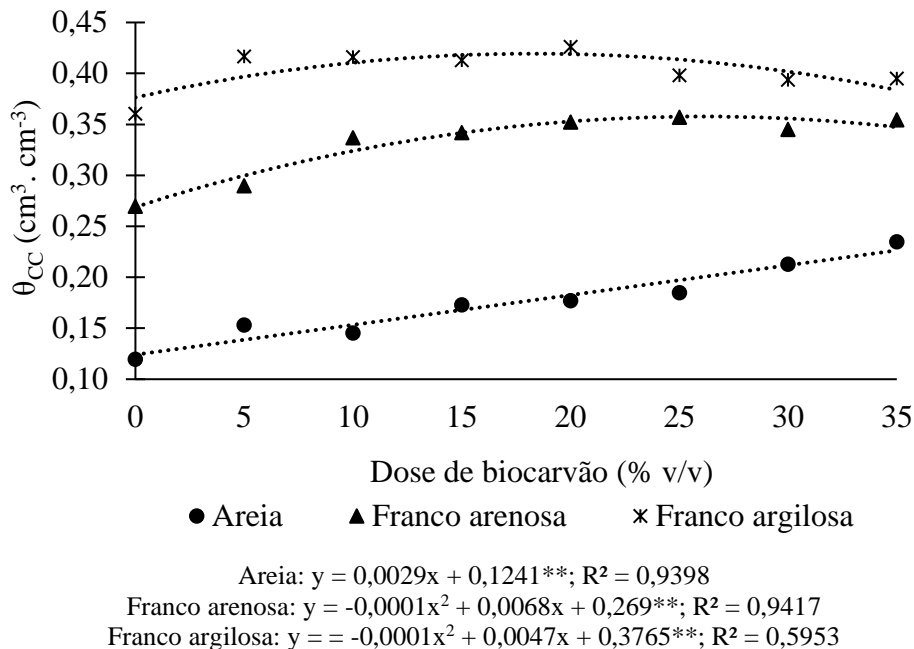
4.3.1 Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})

A umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) foi incrementada substancialmente no solo de textura arenosa, o qual demonstrou aumento de 96,19% da umidade com aplicação da dose máxima de carvão vegetal. O acréscimo das doses neste solo apresentou comportamento linear, em que a dose máxima (35%) proporcionou o maior aumento da umidade na capacidade de campo solo (Figura 27), na qual também pode se observar diminuição do efeito do carvão vegetal com o aumento nos teores de argila do solo, conforme previsto na hipótese desta pesquisa.

Observou-se que os solos de textura franco arenosa e franco argilosa, apesar também do acréscimo, tiveram um comportamento mais tênue, com aumentos máximos de 32,28% e 18,67%, respectivamente, sendo encontrados na dose 25% para o primeiro solo e na dose 20%, para o segundo. No entanto, posteriormente ambos os solos demonstraram redução nos valores da θ_{CC} a partir dessas doses (Figura 27).

Em Razzaghi *et al.* (2020), a alteração do biocarvão aumentou significativamente a θ_{CC} para os solos de textura grossa em 51%, para os solos de textura média aumentou marginalmente em 13% em comparação com os solos de textura fina nos quais a θ_{CC} permaneceu inalterada (<1%) após a aplicação do carvão vegetal. Esses autores explicaram que a capacidade de campo reduzida para os solos de textura fina em relação aos de textura grossa pode ter surgido de microporos do carvão vegetal e do bloqueio dos poros existentes do solo por partículas finas.

Figura 27 - Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



A adição de carvão vegetal desde a dose mínima (5%) incrementou a θ_{CC} na areia, já com o aumento de 27,9% (Figura 28). À medida que as doses foram aumentadas ocorreu aumento linear proporcionando, com a aplicação de 35% de carvão vegetal, o máximo aumento da θ_{CC} em - 96,19%, quando comparado ao tratamento controle. Esse aumento gerou o valor de umidade $0,2351 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, o qual foi próximo à umidade do solo franco arenoso, sem uso do carvão vegetal, cuja umidade era da ordem de $0,2699 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

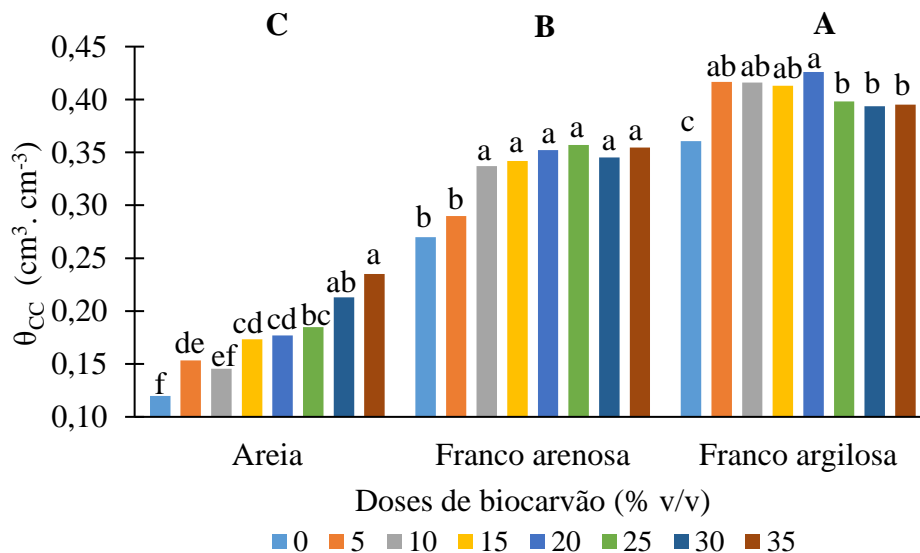
Constatou-se no solo de textura franco arenosa a elevação da umidade a partir da aplicação de 10% de carvão vegetal, a qual não diferiu estatisticamente das doses superiores. No entanto, a aplicação de 25% carvão vegetal proporcionou o maior valor da umidade na capacidade de campo ($0,3571 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), podendo essa ser considerada a dose máxima efetiva.

No solo de textura franco argilosa, o aumento significativo na θ_{CC} se deu desde a aplicação da dose mínima de carvão vegetal (5%), todavia foi semelhante até a dose 20%, a qual proporcionou maior aumento da retenção de água; as doses superiores a essa apresentaram uma queda na umidade. Portanto, a dose máxima efetiva de aplicação de carvão vegetal no solo de textura franco argilosa foi 20% proporcionando uma θ_{CC} de $0,4261 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Estudos que compararam o efeito do carvão vegetal em diferentes texturas de solo relataram um maior benefício em solos arenosos em relação a solos argilosos (Ajayi e Horn, 2016; Kinney *et al.*, 2012; Mollinedo *et al.*, 2015). Duarte *et al.* (2019) encontraram também resultados semelhantes quando compararam retenção de água com adição de biocarvão em solo argiloso e arenoso. Esses autores sugerem que a aplicação de biocarvão nas áreas agrícolas pode contribuir para a redução da frequência da irrigação e isto pode ser particularmente importante em regiões limitadas em água.

Na meta-análise realizada por Edeh *et al.* (2020) verificou-se que, em solo de textura grossa, a aplicação de biocarvão numa faixa entre 30 -70 t.ha⁻¹ aumentou a θ_{CC} em média 36,78%; nos nossos resultados foram verificados aumento médio de 24,66% nessa faixa, que equivalem às doses de 5% a 10%. Esses autores concluíram que o biocarvão precisa ser aplicado em doses mais altas (> 30 t. ha⁻¹) nesses solos para afetar as propriedades da água do solo, enquanto em solos de textura fina a taxa de aplicação de < 30 t. ha⁻¹ já é suficiente e pode ser ainda mais benéfica do que a aplicação de 30 -70 t. ha⁻¹. Esses resultados assemelham-se com os nossos, os quais confirmam que a menor dose aplicada causou um aumento significativo, a qual foi semelhante estatisticamente à dose que causou maior aumento, e ainda favorável em relação às doses maiores (Figura 28).

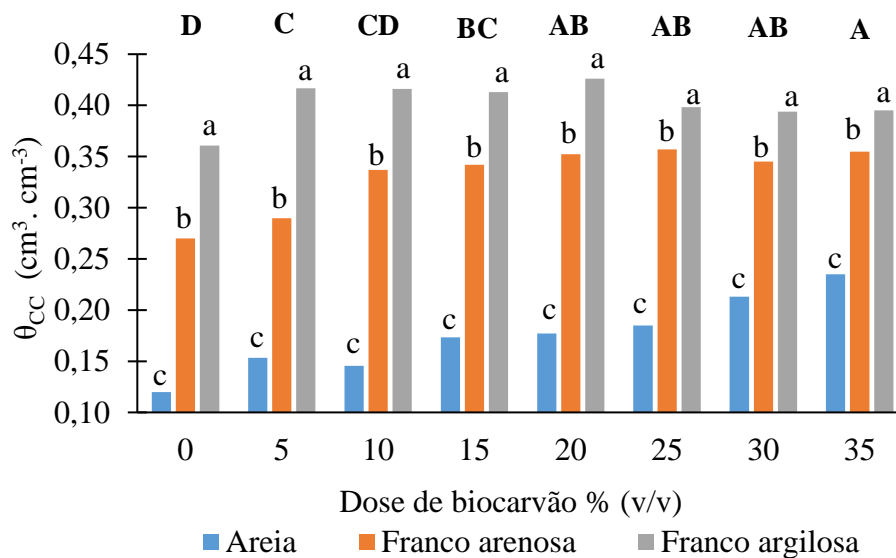
Figura 28 - Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) dos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.



Devereux *et al.* (2012) avaliaram aplicação de biocarvão em solo franco arenoso e concluíram que quanto mais biocarvão (maior dose utilizada foi 5% g. g⁻¹ — equivalente a nossa dose de 20%), mais a água é retida pelo solo, mas ressaltam que a dose ideal de biocarvão deve ser determinada caso a caso. Saffari *et al.* (2021) também ao avaliar um solo franco arenoso validaram o maior valor de umidade quando utilizaram que a maior dose de biocarvão (4% g. g⁻¹).

Apesar de apresentarem máximos aumentos nos valores de umidade em doses próximas, os solos de textura franco arenosa e franco argilosa apresentaram diferença significativa entre eles em todas as doses (Figura 29), destacando que a franco arenosa mostrou aumento mais expressivo da θ_{CC} do que a franco argilosa.

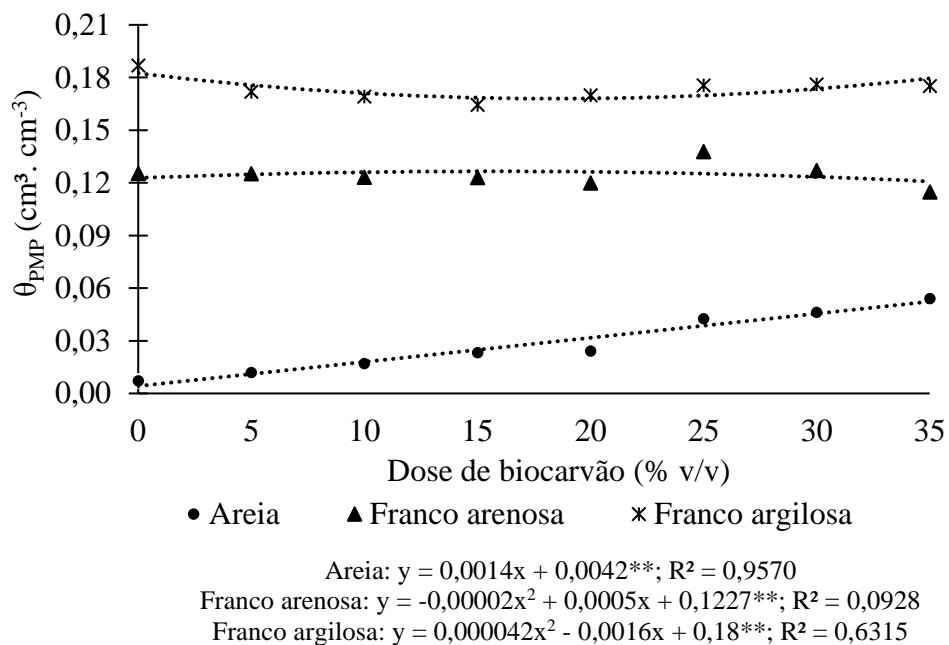
Figura 29 - Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os as classes texturais e letras maiúsculas entre doses.



A umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) teve comportamento bastante similar à θ_{CC} para o solo de textura arenosa; a elevação da umidade foi bastante evidente, alcançando um aumento de 651% com a aplicação da dose máxima de carvão vegetal comparada ao tratamento controle (Figura 30).

Já para os solos de textura franco arenosa e franco argilosa ocorreu redução na θ_{PMP} de 6,23% e 8,41%, respectivamente, apesar de um pico de aumento quando se aplicou 25% de carvão vegetal no solo franco arenoso, porém este ocorrido foi excepcional.

Figura 30 - Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



Prontamente, a aplicação de 5% de carvão vegetal afetou significativamente a θ_{PMP} do solo arenoso e a umidade elevou-se à proporção que as doses foram aumentadas. No solo de textura franco arenosa, apenas o uso da dose de 20% e 35% diferiram do tratamento controle, causando um aumento e uma redução da θ_{PMP} , respectivamente. O efeito do carvão vegetal no solo de textura franco argilosa se deu a partir do uso da dose mínima (5%), a qual não diferenciou estatisticamente das superiores, apesar de ter exibido uma tendência à redução da θ_{PMP} (Figura 31).

Assim como na θ_{CC} , o aumento da θ_{PMP} no solo de textura grossa pode ser atribuído ao aumento da área de superfície específica com a aplicação de carvão vegetal. A grande área de superfície de menor tamanho de partícula de carvão vegetal pode aumentar a ASE de solos de textura grossa para aumentar a retenção de água (Zhang *et al.*, 2016).

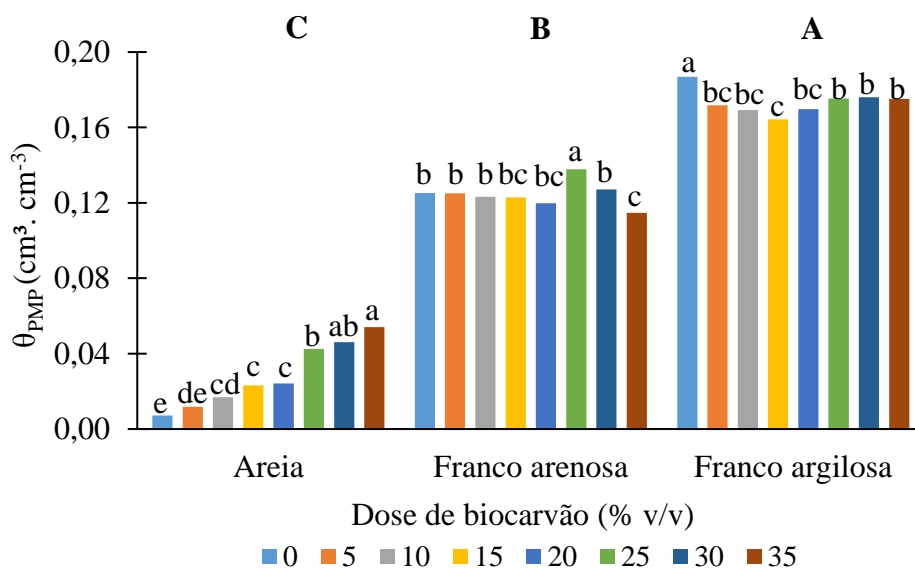
É necessário destacar que a θ_{PMP} do solo arenoso aumentou em quase 652% em relação ao controle quando aplicou o carvão vegetal na dose máxima, pois a θ_{PMP} da areia é

muito baixa e o carvão vegetal tem a capacidade de reter a água em mais de 100% do seu peso, como foi apresentado anteriormente na Tabela 2. Para os demais solos, a θ_{PMP} apresentou uma queda na dose máxima.

Para os solos de textura fina, que já possuem grandes áreas de superfície, a aplicação de carvão vegetal que possua ASE menor do que esses solos pode diminuir a ASE, o que por sua vez reduz a absorção de água do solo no PMP. Do ponto de vista da produção agrícola, uma redução na θ_{PMP} em solos de textura fina juntamente com a θ_{CC} não afetado ou aumentado pode ser benéfico porque significa que as plantas podem extrair mais água do solo antes da exposição às condições de murchamento (Koide *et al.*, 2015).

É válido considerar, portanto, que apenas a areia expressou mudanças significativas na θ_{PMP} , já que os solos de textura franco arenosa e franco argilosa mostraram comportamento quase linear para esta variável comparados aos seus respectivos tratamentos controle (Figura 31).

Figura 31 - Umidade ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) dos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.

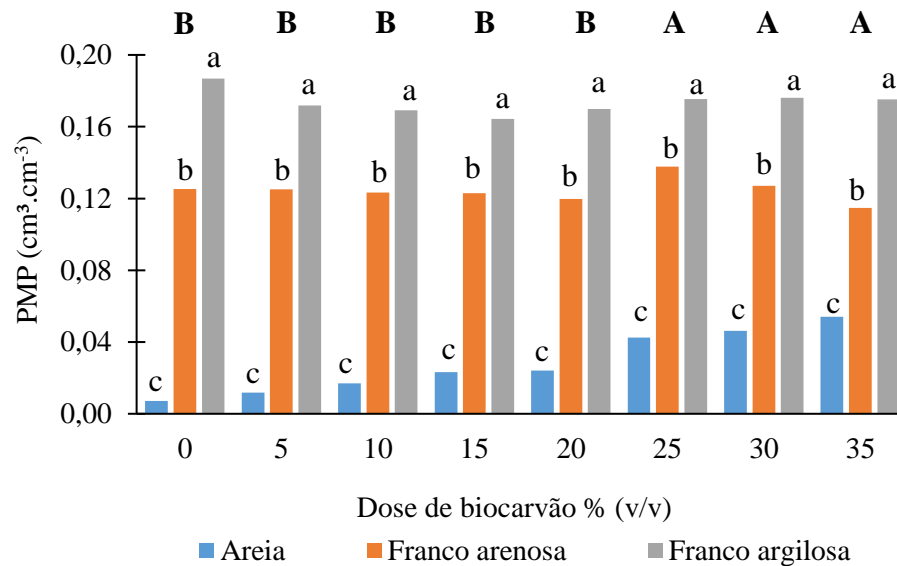


Razzaghi *et al.* (2020) notaram que a aplicação de biocarvão aumentou a θ_{PMP} em até 47% para os solos de textura grossa (areia e areia franca) e apenas 9% para os solos de textura média (franco arenoso, franco, argilo arenosa), já para os solos de textura fina (argila,

franco argilosa, argilo siltosa, silte e franco argilo siltosa), o biocarvão reduziu a θ_{PMP} em 5%. Apesar da areia ter proporcionado aumento mais significativo, os resultados desses autores foram semelhantes aos do presente estudo, o qual apresentou aumento de 10% para o franco arenoso (considerado de textura média) e em 6% franco argiloso (considerado de textura fina).

Ao observar a Figura 32 notou-se que, independentemente da dose de carvão vegetal aplicada, os solos de textura franco arenosa e franco argilosa apresentaram diferença estatística entre eles e, portanto, não foi possível determinar a dose máxima efetiva, destacando que o uso desse condicionador não seria viável para o aumento da θ_{PMP} .

Figura 32 - Umidade ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os as classes texturais e letras maiúsculas entre doses.



A natureza mineral da fração argila é predominantemente caulínica nos Cambissolos da Chapada do Apodi (Mota et al., 2007) e a superfície específica da caulinita varia entre 5 e 10 m² g⁻¹. O carvão vegetal utilizado apresentou uma ASE de 18,57 m² g⁻¹ e isto explica, portanto, porque os solos franco arenoso (com 200 g. kg⁻¹ de argila) e franco argiloso (com 300 g. kg⁻¹ de argila) não apresentaram diferença expressiva na retenção de água quando aplicado o carvão vegetal. Em contrapartida, areias finas que possuem ASE de 0,1 m². g⁻¹, a adição do carvão vegetal, que tem dispõe de 180x mais superfície específica,

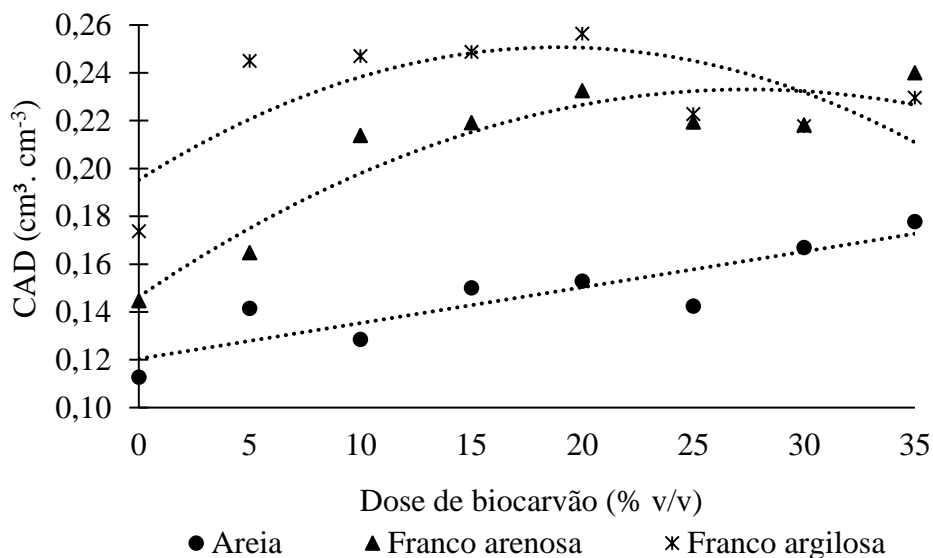
contribuiu consideravelmente para a retenção de água.

4.3.2 Capacidade de água disponível (CAD)

Os três solos avaliados exibiram aumentos significativos da CAD com a aplicação do carvão vegetal (Figura 33), entretanto os solos de textura franco arenosa e franco argilosa apresentaram uma redução após aplicação de 20% de carvão vegetal.

A capacidade de água disponível (CAD) é o intervalo entre a θ_{CC} e θ_{PMP} , portanto essa resposta depende de como essas outras variáveis se manifestaram. À vista disso, os solos de textura franco arenosa e franco argilosa apresentaram também expressivo aumento na CAD, devido às reduções na θ_{PMP} que provocaram um alargamento do intervalo entre a θ_{CC} e θ_{PMP} .

Figura 33 - Capacidade de água disponível (CAD) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



$$\begin{aligned} \text{Areia: } & y = 0,0015x + 0,1204^{**}; R^2 = 0,7926 \\ \text{Franco arenosa: } & y = -0,0001x^2 + 0,0063x + 0,1463^{ns}; R^2 = 0,8779 \\ \text{Franco argilosa: } & y = -0,0001x^2 + 0,005x + 0,1977^{ns}; R^2 = 0,5522 \end{aligned}$$

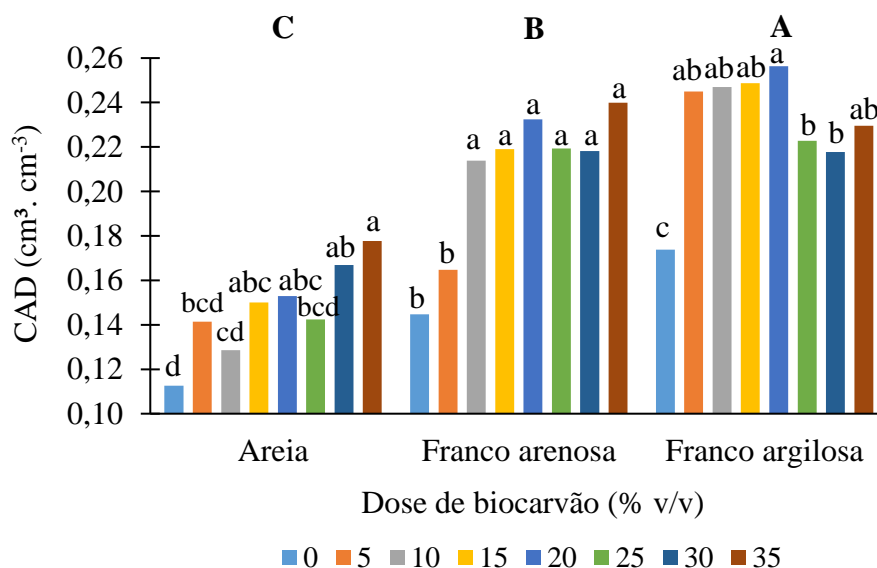
A areia a partir da dose mínima de carvão vegetal (5%) revelou um aumento na CAD, que inclusive se igualou estatisticamente com o solo de textura franco arenosa nesse mesmo tratamento, como pode-se observar na Figura 34. Contudo, apenas com a aplicação de 15% de carvão vegetal houve diferença significativa do tratamento controle. A aplicação de carvão vegetal aumentou significativamente a CAD nos solos de textura grossa em 45% no

estudo de Razzaghi *et al.* (2020), enquanto que no presente estudo esse aumento foi verificado em 57%.

O solo de textura franco arenosa, apesar de apresentar maior valor absoluto da CAD quando aplicada a dose máxima de carvão vegetal (35%), não exibiu diferença significativa a partir do uso de 10%, ou seja, com a utilização de 10% do carvão vegetal, o solo franco arenoso apresenta um aumento significativo e superior para a CAD (Figura 34). Vale destacar que esse comportamento foi idêntico à θ_{CC} para esse solo.

Entretanto, no solo de textura franco argilosa, a adição de 5% de carvão vegetal de imediato proporcionou um aumento significativo na CAD, o qual se manteve igual até a dose de 20%, como apresentado na Figura 34. Inclusive, essa dose foi a máxima efetiva para água disponível, pois, a partir daí, houve uma queda no armazenamento de água. Edeh *et al.* (2020) apresentaram em meta-análise a redução de 31,2% da CAD para solos com conteúdo de argila > 30%.

Figura 34 - Capacidade de água disponível (CAD) dos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.



De acordo com as propostas de Reynolds *et al.* (2008) valores de $CAD < 0,10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ são definidos como “seco”, $0,10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} < CAD < 0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ = “limitado”, $0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} < CAD < 0,20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ = “bom” e $> 0,20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ = ideal. Diante disso, o

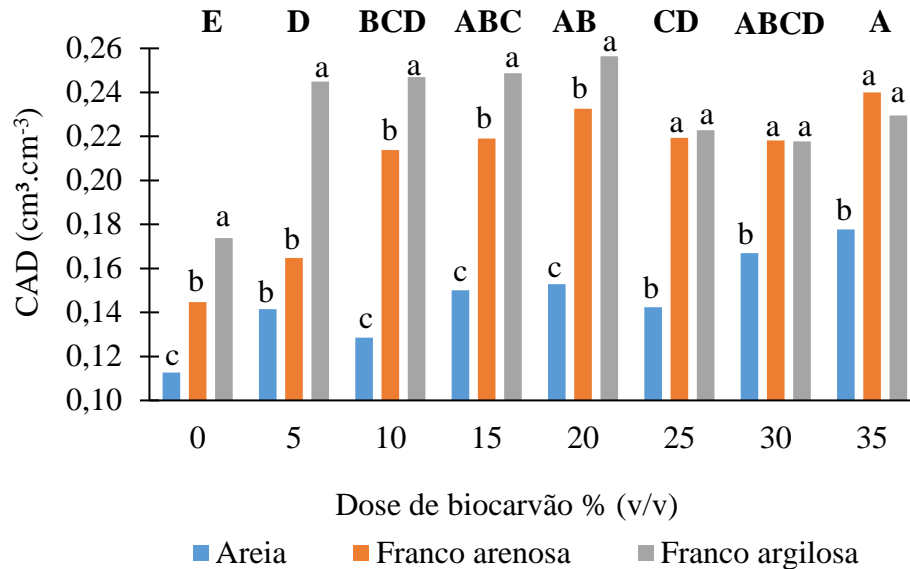
solo arenoso passou de “limitado” para “bom”, o solo franco arenoso de “limitado” para “ideal” e o solo franco argiloso de “bom” para “ideal”. Isto posto, o solo com 20% de argila se mostrou como mais responsivo do que o solo com 30% de argila ao uso de carvão vegetal. Esse fato assevera que solos que contenham mais que 20% de argila não necessitam do uso desse condicionador.

Observou-se que a aplicação de carvão vegetal na areia contribuiu de forma bastante significativa para aumento da CAD, proporcionando disponibilidade de água semelhante ao solo de textura franco arenosa quando adicionado de 5 a 30% de carvão vegetal e ao solo de textura franco argilosa quando adicionado 30% e 35% de carvão vegetal (Figura 35). Observou-se também que o solo de textura franco arenosa se igualou ao solo de textura franco argilosa a partir da aplicação de 25% de carvão vegetal; isso significa que a partir dessa dose ambos os solos se comportam de forma igual.

Blanco-Caqui (2017) constatou que a aplicação de biocarvão aumentou consistentemente a água disponível na planta em 72% dos casos (21 dos 29 solos), uma resposta atribuída à alta microporosidade do biocarvão. O aumento geral na água disponível para as plantas após a aplicação do carvão vegetal é vantajoso na redução da frequência da irrigação, especialmente onde as plantas dependem totalmente desse manejo, contribuindo, portanto, para a redução no custo de produção.

É válido considerar os solos de textura franco arenosa e franco argilosa não apresentaram diferença significativa a partir da aplicação de 20% de carvão vegetal (Figura 35); ou seja, o comportamento desses solos em função da CAD provocado pelo carvão vegetal não são superiores a solos que tenham mais que 200 g. kg⁻¹ de argila a esta dose.

Figura 35 - Capacidade de água disponível (CAD) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os as classes texturais e letras maiúsculas entre doses.

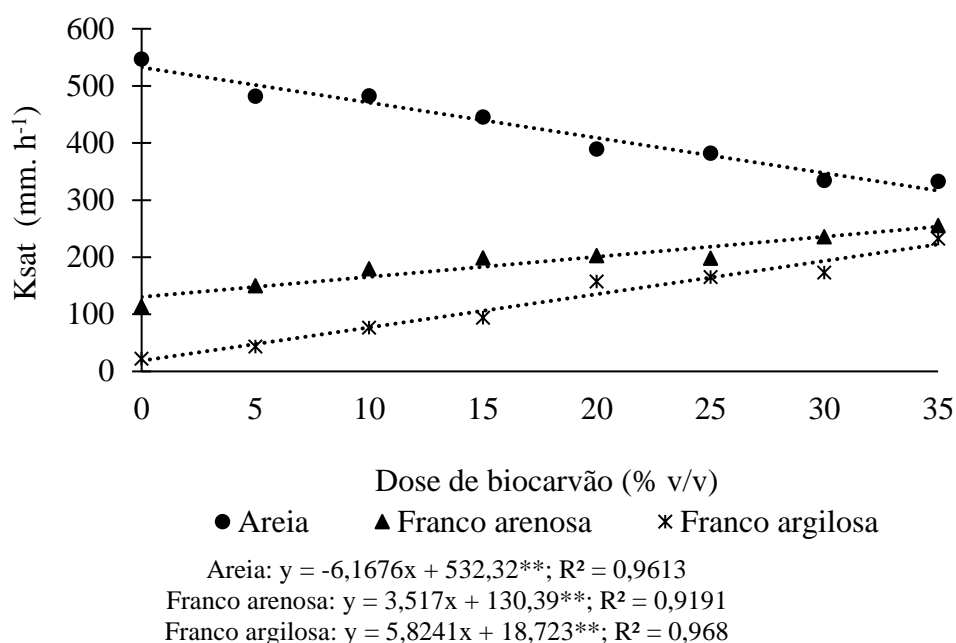


4.3.3 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat})

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) teve comportamento linear em função das doses do carvão vegetal para os solos em estudo, com relação inversa entre K_{sat} e doses do carvão vegetal para a areia, e direta para as texturas franco arenosa e franco argilosa (Figura 36).

Alghamdi (2018) constatou em sua revisão que, conforme aumentou a taxa de aplicação de biocarvão, houve incremento na condutividade hidráulica de solos de textura fina e diminuição correspondente em solos de textura grossa.

Figura 36 - Condutividade hidráulica saturada (Ksat) dos solos em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Nas equações de regressão, (**) indicam significância a 1% de probabilidade.



A aplicação de 15% de carvão vegetal diferiu do tratamento controle nas texturas areia e franco arenosa, proporcionando redução e aumento da Ksat, respectivamente. Essa dose foi semelhante estatisticamente à dose máxima aplicada para o material com textura franco arenosa; já na areia, esse comportamento ocorreu com a aplicação de 20% de carvão vegetal, apesar da dose máxima provocar a maior mudança na Ksat (Figura 3).

A redução da Ksat na areia pode ser benéfica, já que esses solos costumam ser excessivamente drenados. Nesse sentido, segundo os valores de referência que constam em USDA (2017), a Ksat, para esse solo, reduziu de muito alta (546,78 mm h⁻¹), no tratamento controle, para alta (332,89 mm. h⁻¹) na maior dose de carvão vegetal (35%).

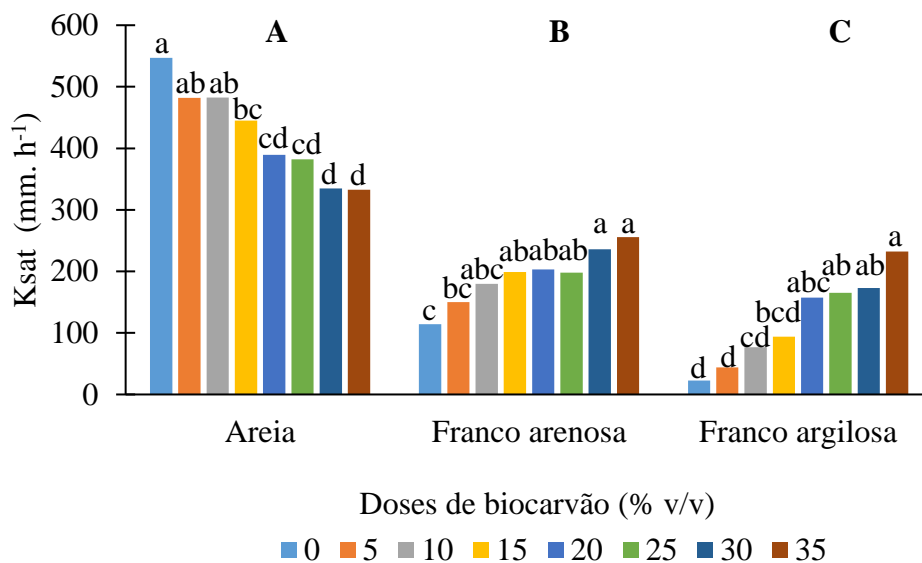
No caso do solo franco arenoso, apesar do aumento de Ksat, a variável continuou sendo classificada como alta (255,59 mm h⁻¹) mesmo na maior dose de carvão vegetal. Com isso, a habilidade desse solo em conduzir água foi mantida pelo uso do condicionador.

Já no solo franco argiloso, a melhoria significativa da Ksat se deu a partir da dose 20%, a qual não diferiu estatisticamente das doses superiores (Figura 3). Ainda segundo os valores de referência que constam em USDA (2017), a Ksat, para esse solo, aumentou de moderadamente alta (22,41 mm h⁻¹), no tratamento controle, para alta (232,50 mm h⁻¹) na

maior dose de carvão vegetal (35%). Portanto, é notória a contribuição do carvão vegetal na melhoria da permissão desse solo ao fluxo de água.

Quando a permissão do solo ao fluxo de água é baixa, há uma maior dificuldade desse recurso alcançar as raízes, podendo não satisfazer a demanda da planta e contribuir com o seu murchamento (HAUSENBUELLER, 1978). Consequentemente, o aumento da Ksat em solos como o franco arenoso e o franco argiloso é altamente favorável para a melhoria da sua qualidade física.

Figura 37 - Condutividade hidráulica dos solos na saturação (Ksat) para os solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa em função das doses de carvão vegetal. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre as doses e letras maiúsculas entre as classes texturais.



Solos de textura grossa têm Ksat mais alta do que solos de textura fina, embora sua porosidade total seja menor (SCHOONOVER; CRIM, 2015). Isso ocorre porque os solos de textura grosseira possuem proporção considerável de macroporos - poros grandes e contínuos resultam em maior condutividade hidráulica (KARAHAN; ERŞAHIN, 2016). Logo, a adição de carvão vegetal a esses solos aumenta a quantidade de microporos e, consequentemente, diminui os macroporos (poros de transmissão), reduzindo seu Ksat e aumentando a retenção de água.

Os resultados podem ser atribuídos ao entupimento dos macroporos por partículas finas de biocarvão, com subsequente aumento da tortuosidade e redução do tamanho dos poros na mistura de areia e biocarvão (ESMAEELNEJAD *et al.*, 2017). Este processo de entupimento de poros em solo arenoso devido a adição de carvão vegetal foi demonstrado por Liu *et al.* (2016).

A redução condutividade hidráulica em areia na saturação com a adição de biocarvão também foi constatada por Ajayi e Horn (2016), Blanco-Canqui (2017), Githinji (2014) e Lim *et al.* (2016). A vantagem é que a diminuição da K_{sat} em areia proporcionada pelo biocarvão é benéfica por culminar em melhoria na sua funcionalidade como reservatório de água às plantas (HUSSAIN *et al.*, 2021).

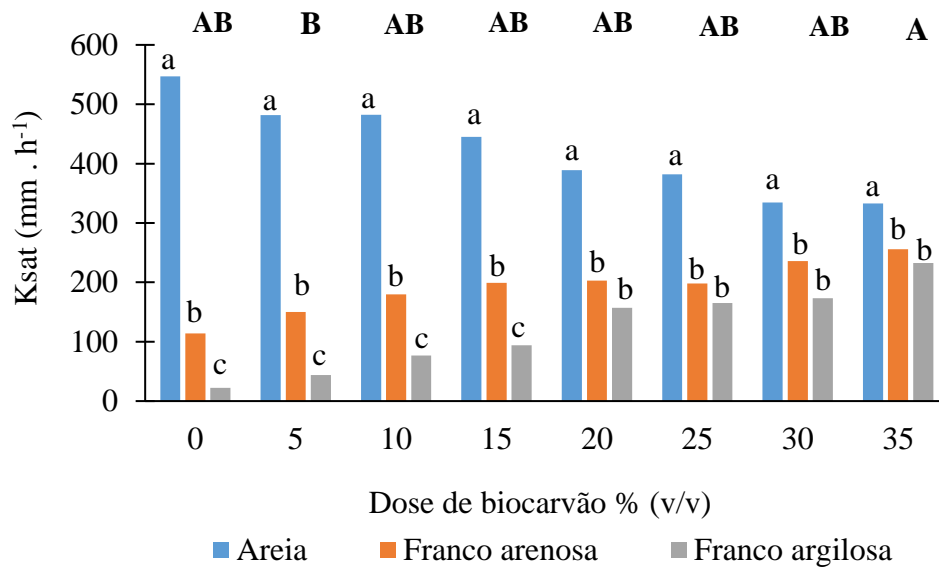
Nos casos em que houve o aumento da condutividade hidráulica na saturação — nos solos franco arenoso e franco argiloso — pode-se inferir que, apesar da diminuição da macroporosidade proporcionada pela aplicação de carvão vegetal, especialmente nas maiores doses, o incremento de K_{sat} pode ser creditado ao fato de que os poros do solo provavelmente passaram a integrar uma rede mais conectada.

Adicional hipótese foi sugerida por outros autores para explicar o aumento da K_{sat} em solos de textura fina. Barnes *et al.* (2014) encontraram que a adição de biocarvão causou aumento de 328% em solo argiloso e explicaram que a partícula do biocarvão e o rearranjo de grãos durante à montagem das colunas de solo resulta em espaços entre eles, o que pode contribuir com o aumento da K_{sat} . Hussain *et al.* (2021) também verificaram o aumento da K_{sat} em solo franco e afirmaram que isto pode ter ocorrido devido aos espaços formados entre o solo e partículas de biocarvão, o que também pode ter ocorrido com os corpos de prova do presente trabalho.

Wong *et al.* (2018) apresentaram relação linear crescente entre a taxa de aplicação de biochar e K_{sat} em argila caulínica e justificaram esse incremento devido ao aumento no diâmetro dos poros quando se adicionou o biocarvão (que possuía poros de maior diâmetro) à argila.

Conforme apresentado na Figura 4, observa-se que os solos franco arenoso e franco argiloso passaram a se comportar de forma igual, estatisticamente, a partir da aplicação de 20% de carvão vegetal; ou seja, alterações significativas provocadas pelo carvão vegetal não são superiores a solos que tenham mais que 200 g kg⁻¹ de argila a esta dose para a condutividade hidráulica do solo saturado.

Figura 38 - Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) em função das doses de carvão vegetal aplicadas nos solos de classe textural areia, franco arenosa e franco argilosa. Letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%; letras minúsculas apresentam diferença entre os as classes texturais e letras maiúsculas entre doses.



5 CONCLUSÕES

Solos com predomínio de areia apresentam mais alterações benéficas nas propriedades físicas e hídricas em resposta à aplicação de carvão vegetal quando comparados a solos de classe textural franco arenosa e franco argilosa, principalmente relacionadas à retenção de água.

A dose máxima, para a maioria das variáveis, foi definida para a textura franco arenosa em 20%, para a textura franco argilosa em 25% e para a areia em 35% (dose máxima avaliada); ou seja, para a areia quanto mais biocarvão adicionado, maiores as alterações.

As respostas dos solos com conteúdo de argila superior a 20% (classes texturais franco arenosa e franco argilosa) para a maioria das variáveis constataam esse valor de conteúdo de argila como limitante à eficiência desse condicionador de solo.

REFERÊNCIAS

- ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M.; WESSOLEK, G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 183-191, 2013.
- AJAYI, A. E.; HORN, R. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. **Soil and Tillage Research**, v.164, p. 34–44, 2016.
- ALAZZAZ, A.; USMAN, A. R.; AHMAD, M.; IBRAHIM, H. M.; ELFAKI, J.; SALLAM, A. S.; AL-WABEL, M. I. Potential short-term negative versus positive effects of olive mill-derived biochar on nutrient availability in a calcareous loamy sand soil. **PloS one**, v. 15, n. 7, p. e0232811, 2020.
- ALGHAMDI, A. G. Biochar as a potential soil additive for improving soil physical properties — a review. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 24, p. 1-16, 2018.
- ALI S.; RIZWAN, M.; QAYYUM, M.F.; OK, Y.S.; IBRAHIM, M.; RIAZ, M.; ARIF, M.S.; HAFEEZ, F.; AL-WABEL, M.I.; SHAHZAD, A.N. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2017.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do Solo - Conceitos e Aplicações**. Imprensa Universitária, Fortaleza, 2008. 290p
- AMOAKWAH, E.; FRIMPONG, K. A.; OKAE-ANTI, D.; ARTHUR, E. Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam. **Geoderma**, v. 307, p. 189-197, 2017.
- ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. **Field Crops Research**, v. 111, n. 1-2, p. 81–84, 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**, v. 337, p. 1–18, 2010.
- BAIAMONTE, G.; CRESCIMANNO, G.; PARRINO, F.; DE PASQUALE, C. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. **Catena**, v. 175, p. 294–303, 2019.
- BALL, B. C.; SCHØNNING, P. Air permeability. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis. Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, p.1141-1158, 2002.
- 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**, v. 9, n. 9, p. e108340, 2014.
- BASSO, A. S.; MIGUEZ, F. E.; LAIRD, D. A.; HORTON, R.; WESTGATE, M. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 132-143, 2013.

- BEUTLER, A. N.; SILVA, M.L.N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C; PERREIRA FILHO. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico Típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.
- BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. “An Analysis of Transformations.” **Journal of the Royal Statistical Society**, Series B 26:211–234, 1964.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- BRANTLEY, K. E~.; BRYE, K. R.; SAVIN, M. C.; LONGER, D. E. Biochar source and application rate effects on soil water retention determined using wetting curves. **Open Journal of Soil Science**, v. 5, n. 01, p. 1, 2015.
- BRASIL. Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006. Normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade, de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília, DF, 12 jul. 2006
- BRITO, A.S. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água de água e ar no solo**. 2010, 114.f, Tese de doutorado, ESALQ, Piracicaba, 2010.
- 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**, v. 102, n. 6, p. 1627-1631, 2010.
- BRUUN, E.W.; PETERSEN, C.T.; HANSEN, E.; HOLM, J.K.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Biochar mendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention. **Soil Use Manag**, v. 30, p. 109–118, 2014.
- BURRELL, L. D.; ZEHETNER, F.; RAMPAZZO, N.; WIMMER, B.; SOJA, G. Long-term effects of biochar on soil physical properties. **Geoderma**, v. 282, p. 96-102, 2016.
- CARVALHO, M. T. M.; MAIA, A. H. N.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P. A. J. J.; HEINEMANN, A. B.; DA SILVA, M.A.S.; PETTER, F. A.; MARIMON, B. H.; MEINKE, H.; SILVA, M. A. S. Biochar increases plant-available water in a Sandy loam soil under anaerobic rice crop system. **Solid Earth**, v. 5, p. 939–952, 2014.
- CARVALHO, M.T.M.; MADARI, B.E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P.N.; LEAL, W.G.O.; HEINEMANN, A.B.; DA SILVA, M.A.S.; MAIA, A.H.N.; PARSONS, D.; MEINKE, H. Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield. **Geoderma** 276, 7–18, 2016.
- CHAMEN, W.C.T.; MOXEY, A.P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLET, P.SD. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.146, p.10-25, 2015.

- CHANDRAN, C. S.; THOMAS, S.; UNNI, M. R. (Ed.). *Organic Farming: New Advances Towards Sustainable Agricultural Systems*. Springer, 2019.
- CHAVES FERNANDES, B. C.; MENDES, K. F.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CALDEIRA, V. P. S.; TEÓFILO, T. M. S.; SILVA, T. S.; SILVA, D. V. Impact of Pyrolysis Temperature on the Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar. *Materials*, v. 13, n. 24, p. 5841, 2020.
- CONZ, R. F., ABBRUZZINI, T. F., ANDRADE, C. A., MILORI, D. M., & CERRI, C. E. **Effect of pyrolysis temperature and feedstock type on agricultural properties and stability and biochars**. Embrapa Instrumentação-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2017.
- COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.
- DE GISI, S; PETTA, L; WENDLAND, C. History and technology of Terra Preta sanitation. *Sustainability*, v. 6, n. 3, p. 1328-1345, 2014.
- DEVEREUX, R.C.; STURROCK, C.J.; MOONEY, S.J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, v. 103, p. 13–18, 2012.
- DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. **Physical Properties of Biocarvão**. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (ed). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. 1. Ed.Londres: Earthscan, 2009. 416 p.
- DUARTE, S. J; GLASER, B.; PELLEGRINO CERRI, C. E. Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils. *Agronomy*, v. 9, n. 4, p. 165, 2019.
- EDEH, I. G.; MAŠEK, O.; BUSS, W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties—New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*, v. 714, p. 136857, 2020.
- EL-NAGGAR, A.; LEE, S. S.; RINKLEBE, J.; FAROOQ, M.; SONG, H.; SARMAH, A.K.; ZIMMERMAN, A.R.; AHMAD, M.; SHAHEEN, S.M.; OK, Y. S. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. *Geoderma*, v. 337, p. 536–554, 2019.
- ELNOUR, A. Y.; ALGHYAMAH, A. A.; SHAIKH, H. M.; POULOSE, A. M.; AL-ZAHRANI, S. M.; ANIS, A.; AL-WABEL, M. I. Effect of pyrolysis temperature on biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites. *Applied Sciences*, v. 9, n. 6, p. 1149, 2019.
- ESMAEELNEJAD, L.; SHORAF, M.; GORJI, M.; HOSSEINI, S. M. Impacts of Woody Biocarvão Particle Size on Porosity and Hydraulic Conductivity of Biochar-Soil Mixtures: An Incubation Study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 48, n. 14, p. 1710-1718, 2017.
- FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve

local livelihoods. J. van Dam, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6935e.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: Lier, Q. J. van (ed.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-27.

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed). **Methods of soil analysis**; Part4 Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-294. (SSSA Book Series, 5).

GITHINJI, L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 4, p. 457-470, 2014.

GLĄB, T.; PALMOWSKA, J.; ZALESKI, T.; GONDEK, K. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. **Geoderma**, v. 281, p. 11-20, 2016.

GLAB, T.; ZABINSKI, A.; SADOWSKA, U.; GONDEK, K.; KOPEC, M.; MIERZWAHERSZTEK, M.; TABOR, S. Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. **Geoderma**, v. 315, p. 27–35, 2018.

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

GLASER, B. Soil biogeochemistry. From molecular to ecosystem level using terra preta and biochar as example. In: Nouredine Benkeblia (Hg.): **Agroecology within Global Environmental Change: Concepts and Applications**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, S. in press (2014).

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, n. 7-8, p. 669-678, 2000.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; DE ALMEIDA, A. Q.; DE CARVALHO JUNIOR, J. I. T.; ANDRADE, K. R. Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. **Catena**, v. 162, p. 414-420, 2018.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.32, p.180-186, 1968.

GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v.34, p.101-114, 1984.

GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do estado de São Paulo: I - Estudo de perfis com horizonte B textural e horizonte B latossólico. **Bragantia**, v. 31, p.145-165,1972.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed). **Methods of soil analysis**; Part4 Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, p. 201-228, 2002. (SSSA Book Series, 5).

- GUO, M. Application of biochar for soil physical improvement. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, v. 63, p. 101-122, 2016.
- HARDIE, M.; CLOTHIER, B.; BOUND, S.; OLIVER, G.; CLOSE, D. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? **Plant Soil** 376:347–361, 2014.
- HAUSENBULLER, R. L. **Soil science, principles and practices**. 2 Ed. Wm. C. 1978.
- HERATH, H. M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. **Geoderma**, v. 209, p. 188-197, 2013.
- HINA, K.; BISHOP, P.; ARBESTAIN, M.C.; CALVELO-PEREIRA, R.; MACIA-AGULLO, J.A.; HINDMARSH, J.; HANLY, J.A.; MACIAS, F.; HEDLEY, M.J. Producing biochars with enhanced surface activity through alkaline pretreatment of feedstocks. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, n. 6–7, p. 606–617, 2010.
- HONGYU, K. **Comparação do GGE-biplot ponderado e AMMI-ponderado com outros modelos de interação genótipo × ambiente**. 2015. 155p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- HUANG, M.; ZETTL, J.D.; BARBOUR, S.L.; PRATT, D. Characterizing the spatial variability of the hydraulic conductivity of Reclamation soils using air permeability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, p. 285-293, 2016.
- HUSSAIN, R.; GHOSH, K. K.; RAVI, K. Impact of biochar produced from hardwood of mesquite on the hydraulic and physical properties of compacted soils for potential application in engineered structures. **Geoderma**, v. 385, p. 114836, 2021.
- IBRAHIM, A.; USMAN, A. R. A.; AL-WABEL, M. I.; NADEEM, M., OK; Y. S.; AL-OMRAN, A. Effects of conocarpus biochar on hydraulic properties of calcareous sandy soil: influence of particle size and application depth. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, n. 2, p. 185-197, 2017.
- INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil (2015). Disponível em: <http://www.biochar-international.org/newsletter> Acesso em: 27 mar 2018.
- KARAHAN, G.; ERŞAHIN, S. Predicting saturated hydraulic conductivity using soil morphological properties. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 5, n. 1, p. 30-38, 2016.
- KEILUWEIT, M.; NICO, P.S.; JOHNSON, M.G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science and Technology**, v. 44, p. 1247–1253, 2010.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KINNEY, T. J.; MASIELLO, C. A.; DUGAN, B.; HOCKADAY, W. C.; DEAN, M. R.; ZYGOURAKIS, K.; BARNES, R. T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. **Biomass and Bioenergy**, v. 41, p. 34-43, 2012.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Proceedings - Soil Science Society of America**, Madison, v. 11, p. 93-99, 1946.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo. 3º edição, 2014.

KOIDE, R. T.; NGUYEN, B. T.; SKINNER, R. H.; DELL, C. J.; PEOPLES, M. S.; ADLER, P. R.; DROHAN, P. J. Biochar amendment of soil improves resilience to climate change. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 5, p. 1084-1091, 2015.

KOLB, T.; AGEE, J.; FULE, P.; MCDOWELL, N.; PEARSON, K.; SALA, A.; WARING, R. Perpetuating old ponderosa pine. **Forest Ecology and Management**, v. 249, n. 3, p. 141–157, 2007.

LAIRD, D.; FLEMING, P.; WANG, B.; HORTON, R.; KARLEN, D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 436-442, 2010.

LAL, R.; SHUKLA, M.R. **Principles of Soil Physics** (2004). Marcel Dekker, New York.

LEI, O.; ZHANG, R. Effects of biochars derived from different feedstock and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. **The Journal of Soils and Sediments** 13, 1561–1572, 2013.

LI, L.; ZHANG, Y. J.; NOVAK, A.; YANG, Y.; WANG, J. Role of Biochar in Improving Sandy Soil Water Retention and Resilience to Drought. **Water**, v. 13, p. 407, 2021.

LIAN, F.; XING, B. Black carbon (biochar) in water/soil environments: molecular structure, sorption, stability, and potential risk. **Environmental science & technology**, v. 51, n. 23, p. 13517-13532, 2017.

LIANG, J. LEHMANN, D. SOLOMON, J. KINYANG, J. GROSSMAN, B. O'NEILL, J.O. SKJEMSTARD, J. THIES, F.J. LUIZA, J. PETERSON, E.G. Neves Black carbon increases CEC in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1719-1730, 2006.

LIBARDI, P. **Dinâmica da Água no Solo** (2018). Vol. 61, 3ª ed. ISBN: 9788531417054. Edusp.

LIM, T. J.; SPOKAS, K. A.; FEYEREISEN, G.; NOVAK, J. M. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. **Chemosphere**, v. 142, p. 136-144, 2016.

LIMA, S. L.; MARIMON, B. H.; MELO-SANTOS, K. D. S.; REIS, S. M.; PETTER, F. A.; VILAR, C. C.; MARIMON, B. S. Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 120-131, 2016.

LIU, Z. B.; DUGAN, C.A.; MASIELLO, R.T.; BARNES, M.E.; GALLAGHER, M. E.; GONNERMANN, H. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar –sand mixtures. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 461-472, 2016.

LIU, Z.; DUGAN, B.; MASIELLO, C.A.; GONNERMANN, H.M. Biochar particle size, shape and porosity act together to influence soil water properties. **PLoSOne**, v. 12, p. 1–19, 2017.

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, n. 125. 2006. 2p.

- MADARI, B. E.; MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Context and importance of biochar research. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 5, p. 1-2, 2012.
- MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARVALHO, M. T. M.; MAIA, A. H. N.; PETTER, F. A.; SANTOS, J. L. S.; TSAI, S. M.; LEAL, W. G. O.; ZEVIANI, W. M. Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. **Geoderma**, v. 305, p. 100–112, 2017.
- MANGRICH, A. S.; CARDOSO, E. M. C.; DOUMER, M. E.; ROMÃO, L. P. C.; VIDAL, M.; RIGOL, A.; NOVOTNY, E. H. Improving the water holding capacity of soils of Northeast Brazil by biochar augmentation. In: **Water Challenges and Solutions on a Global Scale**. American Chemical Society, p. 339-354, 2015.
- MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical methods**. New York, Chapman and Hall, 1986. 159 p.
- MARSH, H.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. **Activated Carbon**. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- MASIELLO, C. A.; DUGAN, B.; BREWER, C. E.; SPOKAS, K. A.; NOVAK, J. M.; LIU, Z.; SORRENTI, G. Biochar effects on soil hydrology. In: **Biochar for Environmental Management**. Routledge, 2015. p. 575-594.
- MCQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, v. 25, p. 217-230, 2002.
- MEI, Y.; XU, J.; ZHANG, Y.; LI, B.; FAN, S.; XU, H. Effect of Fe–N modification on the properties of biochars and their adsorption behavior on tetracycline removal from aqueous solution. **Bioresource Technology**, v. 325, p. 124732, 2021.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 963-969, 2004.
- MOLLINEDO, J.; SCHUMACHER, T. E.; CHINTALA, R. Influence of feedstocks and pyrolysis on biochar's capacity to modify soil water retention characteristics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 114, p. 100-108, 2015.
- MOTA, J.C.A.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; AMARO FILHO, J.; ROMERO, R.E.; MOTA, F.O.B.; LIBARDI, P.L. Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 445-54, 2007.
- MUBARAK, I.; MAILHOL, J.C.; ANGULO-JARAMILLO, R.; RUELLE, P.; BOIVIN, P.; KHALEDIAN, M. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. **Geoderma**, v. 150, p. 158–165, 2009.
- NÓBREGA, Í. P. C. **Efeitos do Biocarvão nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo**. 2011. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Instituto de Agronomia, Universidade Técnica do Lisboa, Lisboa. 2011.
- OBIA, A.; MULDER, J.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G.; BØRRESEN, T. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 35–44, 2016.

OGUNTUNDE, P. G.; ABIODUN, B. J.; AJAYI, A. E.; VAN DE GIESEN, N. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 4, p. 591-596, 2008.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 197-200, 1968.

OMONDI, M. O.; XIA, X.; NAHAYO, A.; LIU, X.; KORAI, P. K.; PAN, G. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, v. 274, p. 28-34, 2016.

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**, v. 13, n. 4, p. 991-1002, 2013.

PAETSCH, L.; MUELLER, C. W.; KÖGEL-KNABNER, I.; LÜTZOW, M.; GIRARDIN, C.; RUMPEL, C. Effect of in-situ aged and fresh biochar on soil hydraulic conditions and microbial C use under drought conditions. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 6852, 2018.

PEAKE, L.; FREDDO, A.; REID, B. J. Sustaining soils and mitigating climate change using biochar. **Sustainability Science and Technology: An Introduction**, p. 109, 2014.

PRANAGAL, J.; KRASKA, P. 10-Years Studies of the Soil Physical Condition after One-Time Biochar Application. **Agronomy**, v. 10, p. 1589, 2020.

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, v. 361, p. 114055, 2020.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, v.36, n.6, p.1931-1935, 2006.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, p. 466-474, 2008.

RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, v. 68, p. 95-112, 1949.

RODRIGUES, S. **Permeabilidade em um Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) -Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; Permeabilidade ao ar em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 105-114, 2011.

SAFFARI, N.; HAJABBASI, M. A.; SHIRANI, H.; MOSADDEGHI, M. R.; OWENS, G. Influence of corn residue biochar on water retention and penetration resistance in a calcareous sandy loam soil. **Geoderma**, v. 383, p. 114734, 2021.

SAMOLADA, M. C.; ZABANIOTOU, A. A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. **Waste Management**, v. 34, n. 2, p. 411-420, 2014.

SAMPAIO, F.M.T.; MENEZES, S.M.; FURTINI, M.B; RIBEIRO, K.D. Correlações entre a permeabilidade e os atributos físicos do solo da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.30, n. 4, p.798-803, 2006.

SCHOONOVER, J. E.; CRIM, J. F. An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 154, n. 1, p. 21-47, 2015.

SILVA, A. P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, F. G.; JÚNIOR, R. N. A.; MESQUITA, R. O.; DA SILVA MARQUES, E.; MOTA, J. C. A. Gas exchanges and growth of maize as affected by aeration porosity and soil compaction. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 3, p. 1-9, 2020.

SILVA, L. C.; CORRÊA, R. S.; WRIGHT, J. L.; BOMFIM, B.; HENDRICKS, L.; GAVIN, D. G.; SANTOS, R. V. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2021.

SILVEIRA JUNIOR, S.D.; SILVA, A.P.; FIGUEIREDO, G.C.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p. 1854-1867, 2012.

SILVEIRA, L. R.; BRITO, A.S.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 429-436, 2011.

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

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

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

SUÁREZ-HERNÁNDEZ, L.; BARRERA-ZAPATA, R. Morphological and physicochemical characterization of biochar produced by gasification of selected forestry species. **Revista Facultad de Ingeniería**, v. 26, n. 46, p. 123-130, 2017.

SULIMAN, W.; HARSH, J.B.; ABU-LAIL, N. I.; FORTUNA, A. M.; DALLMEYER, I.; GARCIA-PÉREZ, M. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 139–147, 2017.

SUN, L.; WAN, S.; LUO, W. Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: characterization, equilibrium, and kinetic studies. **Bioresource technology**, v. 140, p. 406-413, 2013b.

- SUN, Y .; GAO, B .; YAO, Y .; FANG, J .; ZHANG, M .; ZHOU, Y .; CHEN, H .; YANG, L. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. **The Chemical Engineering Journal**, v. 240, p. 574–578, 2014.
- SUN, Z.; MOLDRUP, P.; ELSGAARD, L.; ARTHUR, E.; BRUUN, E. W.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; DE JONGE, L.W. Direct and indirect short-term effects of biochar on physical characteristics of an arable sandy loam. **Soil Science**, v. 178, n. 9, p. 465–473, 2013.
- TANURE, M. M. C.; DA COSTA, L. M.; HUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; CECON, P. R.; JUNIOR, J. D. P.; DA LUZ, J. M. R. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 164-173, 2019.
- TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, n. 1, p. 191-215, 2020.
- TRIFUNOVIC, B.; GONZALES, H. B.; RAVI, S.; SHARRATT, B. S.; MOHANTY, S. K. Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 4, p. 884-893, 2018.
- TRYON, E. H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecology and Monograph**, v. 18, n. 1, p. 81–115, 1948.
- VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A.C.; VELDE, M. VAN DER; DIAFAS, I. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: **European Commission**, 2010. 149p.
- VILLAGRA-MENDOZA, K.; HORN, R. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. **Geoderma**, v. 326, p. 88–95, 2018.
- WANG, D.; LI, C.; PARIKH, S. J.; SCOW, K. M. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—A multi-scale analysis. **Geoderma**, v. 340, p. 185-191, 2019.
- WANG, X.; CHEN, T.; GE, Y.; JIA, Y. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. **Journal of Hazardous Materials**, v. 160, n. 2–3, p. 554–558, 2008.
- WAYNE, E. Conquistadors, cannibals and climate change: A brief history of biochar. **Pro-Natura International. Retrieved October**, v. 11, p. 2013, 2012.
- WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.
- WEI, L.; SHUTAO, W.; JIN, Z.; TONG, X. Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure. **Bioresource Technology**. 154, 148–154, 2014.
- WONG, J. T. F.; CHEN, Z.; NG, C. W. W.; WONG, M. H. Gas permeability of biochar-amended clay: potential alternative landfill final cover material. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 8, p. 7126-7131, 2016.
- WONG, J. T. F.; CHEN, Z.; WONG, A. Y. Y.; NG, C. W. W.; WONG, M. H. Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. **Environmental pollution**, v. 234, p. 468-472, 2018.

XU, G.; ZHANG, Y.; SUN, J.; SHAO, H. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil. **Science of the Total Environment**, v. 568, p. 910-915, 2016.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. cap. 4, p. 161-207.

ZHANG, H.; CHEN, C.; GRAY, E. M.; BOYD, S. E. Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 136-146, 2017.

ZHANG, J.; CHEN, Q.; YOU, C. Biochar Effect on Water Evaporation and Hydraulic Conductivity in Sandy Soil. **Pedosphere**, 26, 265–272, 2016.

ZHAO, B.; O'CONNOR, D.; ZHANG, J.; PENG, T.; SHEN, Z.; TSANG, D. C.; HOU, D. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 977-987, 2018.

ZHENG, Y.; HAN, X.; LI, Y.; YANG, J.; LI, N.; AN, N. Effects of biochar and straw application on the physicochemical and biological properties of paddy soils in Northeast China. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2019.

APÊNDICE A - ANÁLISES DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS COM SUAS RESPECTIVAS SIGNIFICÂNCIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO

Tabela 4 - Análise de variância para densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), permeabilidade intrínseca ao ar (Kar), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de armazenagem de água (CAD) e condutividade hidráulica saturada (Ksat).

Fonte de Variação	Ds	PT	Ma	Kar	CC	PMP	CAD	Ksat
Textura do solo	1936,81**	694,42**	515,51**	113,15**	2242,60**	11960,04**	299,42**	552,52**
Dose de biocarvão	475,72**	16,43**	25,80**	40,70**	38,39**	36,03**	32,02**	1,82**
Textura * Dose	15,30**	19,28**	3,08**	6,14*	10,47**	34,62**	6,70**	17,20**
CV (%)	1,55	2,42	18,37	17,44	5,12	3,94	8,10	17,39