



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE FITOPATOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOPATOLOGIA**

**EFEITO DO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO SOBRE
Meloidogyne incognita EM FEIJÃO-CAUPI**

JOÃO LUCAS PIMENTEL DUARTE

Brasília – DF

2022

JOÃO LUCAS PIMENTEL DUARTE

**EFEITO DO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO SOBRE
Meloidogyne incognita EM FEIJÃO-CAUPI**

Tese apresentada à
Universidade de Brasília
como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor
em Fitopatologia pelo
Programa de Pós-graduação
em Fitopatologia

Orientador

Prof. Luiz Eduardo Bassay Blum, PhD.

**BRASÍLIA
DISTRITO FEDERAL - BRASIL
2022**

FICHA CATALOGRÁFICA

Duarte, J. L. P.

Efeito do Biocarvão de Lodo de Esgoto Sobre *Meloidogyne incognita* em Feijão-caupi. /João Lucas Pimentel Duarte. Brasília, 2022.

Número de páginas p.155: il.

Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Fitopatologia, Universidade de Brasília, Brasília.

I. Biocarvão – Nematode-das-galhas.

II. Universidade de Brasília. PPG/FIT.

III. Efeito do Biocarvão de Lodo de Esgoto Sobre *Meloidogyne incognita* em Feijão-caupi.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

DUARTE, J. L. P. **Efeito do Biocarvão de Lodo de Esgoto Sobre *Meloidogyne incognita* em Feijão-caupi**. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Programa de Pós-graduação em Fitopatologia, Universidade de Brasília. Brasília, p.155. 2022.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: João Lucas Pimentel Duarte

Título da Tese: Efeito do Biocarvão de Lodo de Esgoto Sobre *Meloidogyne incognita* em Feijão-caupi.

Grau: Doutor **Ano:** 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação somente com a autorização por escrito. É permitida a divulgação total ou parcial deste documento desde que citada a fonte adequadamente.

João Lucas Pimentel Duarte

E-mail - j.lucas.pimentel@gmail.com

Trabalho realizado junto ao Departamento de Fitopatologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, sob orientação do Professor **Luiz Eduardo Bassay Blum**, com apoio do Programa de Capacitação de Pessoal de Nível Superior – CAPES e Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal - FAP-DF

**EFEITO DO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO SOBRE
Meloidogyne incognita EM FEIJÃO-CAUPI**

JOÃO LUCAS PIMENTEL DUARTE

Tese aprovada em 24 de agosto de 2022.

**Prof. Juvenil Enrique Cares
Examinador Interno**

**Dr. Dilson da Cunha Costa
Examinador Externo (Embrapa)**

**Dr. Valdir Lourenço Junior
Examinador Externo (Embrapa)**

**Prof. Luiz Eduardo Bassay Blum
Orientador (Presidente)**

BRASÍLIA – DISTRITO FEDERAL
BRASIL
2022

“Quem pensa conhecer alguma coisa, ainda não conhece como deveria.”

(Apóstolo Paulo - 1 Co, 8,2)

As inumeráveis vítimas do coronavírus (In memoriam) as vidas perdidas durante a pandemia de COVID-19, um período sombrio em que parte deste estudo foi desenvolvido.

Dedico.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por me conduzir e iluminar com sabedoria. A minha mãe Maria Elina e meu pai Raimundo Nonato pelo exemplo, orações, aconselhamentos, compreensão, amor e carinho presentes em todos os momentos. Aos meus irmãos David Cantanhede e Guilherme Victor que sempre me deram suporte ao longo dessa caminhada. Agradecimento especial aos meus avós, o Sr. Domingos Duarte e Sra. Laurita Pereira e a minha tia Rejane Duarte que foram fundamentais durante a minha formação;

A minha noiva Dra. Jamile Mendes pelo companheirismo e parceria na realização de etapas fundamentais da realização da minha pesquisa;

Ao professor Dr. Luiz Eduardo Bassay Blum pela orientação, aconselhamentos e apoio na realização deste estudo;

Ao professor Dr. Jansen Rodrigo dos Santos pelo apoio, aconselhamentos e à Ma. Michelline do Amaral Dias por disponibilizar o inóculo do patógeno usado na realização deste estudo;

Ao professor Dr. Cícero Célio e o Dr. Alyson Araújo pelo apoio, parceria e pioneirismo com a pesquisa sobre o uso do biocarvão de lodo de esgoto;

Ao Laboratório Micellium e ao prof. Dr. Osvaldo Kiyoshi Yamanishi que me apoiaram com a realização das análises de solo e plantas;

Ao prof. Dr. José Ricardo Peixoto e à prof. Dra. Michelle Vilela pelo apoio na minha formação acadêmica na pós-graduação;

À equipe de funcionários e técnicos da Estação Biológica e do Laboratório de Nematologia do Departamento de Fitopatologia da UnB em especial ao Wasington, Deusdete, Francisco e Kamila, pelo suporte em etapas fundamentais deste trabalho;

A todos os meus colegas contemporâneos dos Programas de Pós-graduação que em muitos momentos compartilharam a sala de aula e laboratórios comigo, em especial a Adriana, Aline, Amanda, Bianca, Caio, Dezianny, Débora, Érica, Firmino, Gabriel, Gustavo, Hyan, Jefferson, Jennifer, Lincoln, Lucas, Luciane, Miguel, Paula, Ramon, Raycenne, Reinaldo, Rildo, Samuel, Sheila, Thais, Victoria, Vitor e Viviam;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (pela bolsa de estudos), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal – FAP-DF pelo financiamento do projeto de pesquisa e a todos os professores do Departamento e do Programa de Pós-Graduação em Fitopatologia, pelo aprendizado e referência profissional;

Aos membros avaliadores que se dispuseram a participar e colaborar com seus conhecimentos e sugestões para a revisão deste estudo;

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

Meu muito obrigado! Que Deus possa sempre abençoar a vida de cada um.

SUMARIO

	Página
LISTA DE TABELAS	5
LISTA DE FIGURAS	6
RESUMO GERAL	9
GENERAL ABSTRACT	10
INTRODUÇÃO GERAL	11
JUSTIFICATIVA	13
OBJETIVO GERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA	15
1. O uso do biocarvão na agricultura.....	15
1.1. Lodo de esgoto na agricultura.....	17
1.2. Transformação de lodo de esgoto em biocarvão.....	18
1.3. Efeito do biocarvão em fitopatógenos.....	19
1.4. O Nematóide-das-galhas <i>Meloidogyne</i> spp.....	25
1.4.1. Ciclo de vida de <i>Meloidogyne</i> spp.....	26
1.4.2. Princípios e medidas de controle para <i>Meloidogyne</i> spp.....	29
1.5. A cultivo de feijão-caupi.....	33
1.5.1. Exigências edafoclimáticas da cultura do feijão-caupi.....	34
1.5.2. O cultivar BRS-Tumucumaque.....	35
1.5.3. Doenças do feijão-caupi.....	37
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
CAPÍTULO 2: BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI EM SOLO ÁCIDO DA REGIÃO DO CERRADO	51
RESUMO	52
ABSTRACT	53
1. INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais.....	56
2.2. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos.....	56
2.3. Local de coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão.....	56
2.4. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo.....	57
2.5. Caracterização física do solo utilizado nos ensaios.....	58
2.6. Caracterização química do solo, do lodo de esgoto e do biocarvão de lodo de esgoto.....	58
2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento.....	60
2.8. Medidas da condutividade elétrica e temperatura do solo.....	60
2.9. Avaliação dos parâmetros indicadores do desenvolvimento das plantas.....	60

2.10. Análises da fertilidade química do solo.....	61
2.11. Delineamento e análises estatísticas.....	61
3. RESULTADOS.....	62
3.1. Mudanças nas propriedades químicas do solo.....	62
3.2. Parâmetros físicos do solo: temperatura e condutividade elétrica.....	66
3.3. Crescimento vegetativo: altura e diâmetro das plantas de feijão-caupi.....	67
3.4. Avaliação das massas frescas e secas das raízes da parte aérea e da produção de vagens em plantas de feijão-caupi.....	70
4. DISCUSSÃO.....	73
5. CONCLUSÕES.....	75
6. REFERÊNCIAS.....	76
CAPÍTULO 3: BIOCÁRVÃO NO MANEJO DE <i>Meloidogyne incognita</i> EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI	80
RESUMO	81
ABSTRACT	82
1. INTRODUÇÃO	83
2. MATERIAL E MÉTODOS	85
2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais.....	85
2.2. Local de coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão.....	85
2.3. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos.....	85
2.4. Caracterização físico/química do solo, do lodo de esgoto e biocarvão de lodo de esgoto.....	85
2.5. Adubação do solo.....	85
2.6. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo.....	85
2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento.....	85
2.8. Origem e manutenção do inóculo de <i>Meloidogyne incognita</i>	86
2.9. Inoculação das Plantas de feijão-caupi cultivadas em vasos contendo biocarvão.....	87
2.10. Extração de ovos e J ₂ a partir de plantas de feijão-caupi.....	87
2.11. Avaliação dos parâmetros utilizados relativos à infecção do <i>Meloidogyne incognita</i>	87
2.12. Análise de solo e planta.....	88
2.13. Delineamento e análises estatísticas utilizadas na avaliação do experimento.....	88
3. RESULTADOS.....	89
3.1. Mudanças na fertilidade química do solo.....	89
3.2. Análise nutricional da planta de feijão-caupi.....	93
3.3. Crescimento em altura, produção de vagens, massas frescas e secas da parte aérea de plantas de feijão-caupi inoculadas com <i>Meloidogyne incognita</i>	96
3.4. População final de nematoides na raiz, fator de reprodução, número de ovos por grama de raiz de plantas de feijão-caupi inoculadas com <i>Meloidogyne incognita</i>	97
4. DISCUSSÃO.....	100
5. CONCLUSÕES.....	104
6. REFERÊNCIAS.....	106

CAPÍTULO 4: EFEITO DA INCUBAÇÃO DO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE SEIS MESES E UM ANO NO CONTROLE DE *Meloidogyne incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI 111

RESUMO	112
ABSTRACT	113
1. INTRODUÇÃO	114
2. MATERIAL E MÉTODOS	116
2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais.....	116
2.2. Local de coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão.....	117
2.3. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos.....	117
2.4. Características físico/química do solo, do lodo de esgoto e biocarvão de lodo de esgoto.	117
2.5. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo.....	119
2.6. Incubação do biocarvão de lodo de esgoto no solo.....	119
2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento.....	119
2.8. Origem e manutenção do inóculo de <i>Meloidogyne incognita</i>	119
2.9. Extração de ovos e J ₂ a partir de plantas de feijão-caupi.....	119
2.10. Inoculação das plantas de feijão-caupi cultivadas em vasos contendo biocarvão.....	119
2.11. Avaliação dos parâmetros utilizados relativos à infecção do <i>Meloidogyne incognita</i>	119
2.12. Delineamento e análises estatísticas utilizadas na avaliação do experimento.....	119
3. RESULTADOS	120
3.1. População de <i>Meloidogyne incognita</i> no sistema radicular.....	120
3.2. Número de ovos e juvenis de segundo estágio por grama de raiz.....	121
3.3. Reprodução de <i>Meloidogyne incognita</i>	122
4. DISCUSSÃO	124
5. CONCLUSÕES	128
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

CAPÍTULO 5: ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS INDUZIDAS PELO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE UM ANO EM SOLO CULTIVADO EM CASA DE VEGETAÇÃO COM FEIJÃO-CAUPI INOCULADO COM *Meloidogyne incognita* MEDIDAS PELA BIOANÁLISE DE SOLO 134

RESUMO	135
ABSTRACT	136
1. INTRODUÇÃO	137
2. MATERIAL E MÉTODOS	138
2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais.....	138
2.2. Local de coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão	138
2.3. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos.....	139
2.4. Caracterização físico/química do solo, do lodo de esgoto e biocarvão de lodo de esgoto.	139
2.5. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo.....	139
2.6. Incubação do biocarvão de lodo de esgoto no solo.....	139

2.6. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento.....	139
2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento.....	139
2.8. Origem e manutenção do inóculo de <i>Meloidogyne incognita</i>	139
2.9. Coleta de amostras de solo para a bioanálise.....	139
2.10. Bioanálise.....	140
2.10.1. Análise enzimática.....	140
2.10.2. Análise química do solo.....	140
2.10.3. Índices de qualidade do Solo	140
2.11. Delineamento e análises estatísticas utilizadas na avaliação do experimento.....	141
3. RESULTADOS	142
3.1. Fertilidade química do solo após um ano da aplicação do biocarvão de lodo de esgoto...	142
3.2. Teores de enzimas bioindicadores de atividade microbológica e de matéria orgânica do solo.....	144
4. DISCUSSÃO	146
5. CONCLUSÕES	150
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	 155

LISTA DE TABELAS

Página

CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1. Princípios de controle associados ao nematoide-das-galhas..... 32

CAPÍTULO 2: BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI EM SOLO ÁCIDO DA REGIÃO DO CERRADO

Tabela 1. Análise granulométrica em quantidades e percentuais de areia, silte e argila do Latossolo Vermelho utilizado nos ensaios..... 58

Tabela 2. Propriedades físico-químicas do solo, lodo de esgoto e dos biocarvões de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C)..... 59

CAPÍTULO 4: EFEITO DA INCUBAÇÃO DO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE SEIS MESES E UM ANO NO CONTROLE DE *Meloidogyne incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do Latossolo Vermelho, lodo de esgoto e dos biocarvões de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) utilizados nos ensaios com a incubação.....118

CAPÍTULO 5: ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS INDUZIDAS PELO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE UM ANO EM SOLO CULTIVADO EM CASA DE VEGETAÇÃO COM FEIJÃO-CAUPI INOCULADO COM *Meloidogyne incognita* MEDIDAS PELA BIOANÁLISE DE SOLO.

Tabela 1. Fertilidade química de Latossolo Vermelho autoclavado, medida pelo CO-carbono orgânico, pH-potencial hidrogeniônico, P-fósforo, K-potássio, Ca-cálcio, Mg-magnésio, acidez titulável, CTC - capacidade de troca catiônica, SB - soma de bases e saturação de bases, após um ano da aplicação e incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas concentrações (1,0% e 2,0%), cultivado com feijão-caupi e inoculado com *Meloidogyne incognita* em casa de vegetação..... 143

Tabela 2. Teores das enzimas (arilsulfatase e β -glicosidade) bioindicadoras da atividade microbiológica no solo, e matéria orgânica (MO) após o período de um ano da aplicação e incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas concentrações (1,0% e 2,0%), em amostras de Latossolo Vermelho autoclavado e com cultivo de feijão-caupi inoculado com *Meloidogyne incognita* em casa de vegetação.....144

Tabela 3. Índices de qualidade e capacidades do solo em ciclar, armazenar e suprir nutrientes. Índice da atividade química e microbiológica (IQS_{Fertbio}), índice da atividade biológica (IQS_{Biológico}), índice da atividade química (IQS_{Químico}) em amostras de Latossolo Vermelho autoclavado, após um ano da aplicação e incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas concentrações (1,0% e 2,0%), com cultivo de feijão-caupi inoculado com *Meloidogyne incognita*.....145

LISTA DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1. Microscopia Eletrônica de Varredura (barra = 1µm). (A) Fragmento de lodo de esgoto seco ao ar (BCLE) contendo bactérias (BFC) em formato de cocos e hifas (HF) de fungos. (B) Fragmento de biocarvão de lodo de esgoto seco pirolisado a 500 °C livre de microrganismos. (Foto - J. L. P. Duarte, Laboratório de Microscopia Eletrônicas, Departamento de Biologia Celular, Instituto de Ciência Biológicas, Universidade de Brasília, UnB, 2021) 18

Figura 2. Microscopia Eletrônica de Varredura (barra = 10µm). Fragmento de biocarvão de lodo de esgoto (BCLE) seco pirolisado a 300 °C mostrando vestígios de bactérias de formato cocos (BFC), poros (seta) e fragmentos de hifas fúngicas (HF). (Foto - J. L. P. Duarte, Laboratório de Microscopia Eletrônica, Departamento de Biologia Celular, Instituto de Ciência Biológicas, Universidade de Brasília, UnB, 2021) 24

Figura 3. Ciclo de vida do nematoide-das-galhas *Meloidogyne* spp..... 27

Figura 4. Raízes de feijão-caupi inoculadas com *Meloidogyne incognita* em diferentes estádios de desenvolvimento do seu ciclo de vida no interior do tecido radicular, corados com fucsina ácida pelo método de Byrd et al. (1983). (A) estágio J₂ (06 dias após a inoculação – DAI), (B) estágio J₃ (09 – DAI), (C) estágio J₄ (12 – DAI), (D) estágio J₄ (15 – DAI), (E) estágio J₄ (18 – DAI), (F) fêmea adulta (25 – DAI). ¹TV: Tecido vascular da raiz, J₂: Juvenil de segundo estágio, J₃: juvenil de terceiro estágio, J₄: juvenil de quarto estágio, FA: fêmea adulta. (Foto – T. F. SILVA, Laboratório de Nematologia, Departamento de Fitopatologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília - UnB, 2021) 28

CAPÍTULO 2: BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI EM SOLO ÁCIDO DA REGIÃO DO CERRADO

Figura 1. Preparo do biocarvão de lodo de esgoto. (A) trituração do lodo de esgoto, após a secagem, (B) lodo de esgoto triturado, (C) forno mufla adaptado para realização da pirólise, (D) recipiente metálico adaptado e vedado para o processo de preparo do biocarvão, (E) biocarvão 300 °C, (F) biocarvão 500 °C..... 57

Figura 2. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas propriedades químicas e macronutrientes no solo. A: potencial hidrogeniônico, B: matéria orgânica, C: capacidade de troca catiônica, D: fósforo, E: potássio, F: cálcio, G: magnésio, H: enxofre..... 64

Figura 3. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos micronutrientes no solo. A: zinco, B: manganês, C: cobre, D: boro, E: Ferro, F: Cobalto..... 65

Figura 4. Temperatura do solo (A) e condutividade elétrica-CE (B) em vasos com Latossolo Vermelho cultivado com plantas de feijão-caupi em casa de vegetação, com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) 67

Figura 5. Crescimento em altura (A) e diâmetro do caule (B) de plantas de feijão-caupi cultivadas em vasos com Latossolo Vermelho em casa de vegetação, com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) 69

Figura 6. Massa fresca-MFR (A) e massa seca da raiz-MSR (B) Massa fresca da parte aérea-MFPA (C) e massa seca da parte aérea-MSPA (D) de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C)71

Figura 7. Produção de vagens de plantas de feijão-caupi, cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C)72

Figura 8. Massa fresca (MFR) e massa seca (MSR) do sistema radicular de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos com (Latossolo Vermelho) esterilizado com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto, preparado nas temperaturas de 300° e 500° C 72

CAPÍTULO 3: BIOCÁRVÃO NO MANEJO DE *Meloidogyne incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI

Figura 1. Perfil izoenzimático de esterase em gel de poliacrilamida 10% para identificação de *Meloidogyne* spp. ¹Perfil da população utilizada nos ensaios confirmando a espécie *Meloidogyne incognita*.²Perfil da espécie *Meloidogyne javanica*..... 86

Figura 2. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas propriedades e macronutrientes no solo. A: potencial hidrogeniônico, B: matéria orgânica, C: capacidade de troca catiônica, D: fósforo, E: potássio, F: cálcio, G: magnésio, H: enxofre..... 91

Figura 3. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos micronutrientes no solo. A: zinco, B: manganês, C: cobre, D: boro, E: Ferro, F: Cobalto..... 92

Figura 4. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos macronutrientes na planta. A: nitrogênio B: fósforo, C: potássio, D: cálcio, E: magnésio, F: enxofre..... 94

Figura 5. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos micronutrientes na planta. A: ferro, B: manganês, C: cobre, D: zinco, E:boro..... 95

Figura 6. Crescimento em altura (A), produção de vagens por planta (B) massa fresca da parte aérea-MFPA (C) e massa seca da parte aérea-MSPA (D) de plantas de feijão-caupi, cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho com diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) e inoculadas com *Meloidogyne incognita*. 97

Figura 7. População final de nematoides (ovos e J₂) na raiz-PFNR (A), fator de reprodução-FR (B), massa fresca da raiz-MFR (C), número de nematoides (ovos e J₂) por grama de raiz-NNGR (D) em plantas de feijão-caupi inoculadas com *Meloidogyne incognita* e cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho, com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C). 99

Figura 8. Sistema radicular de plantas de feijão-caupi após 90 dias da inoculação com *Meloidogyne incognita*, em plantas cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo vermelho, com a aplicação de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto. 100

CAPÍTULO 4: EFEITO DA INCUBAÇÃO DO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE SEIS MESES E UM ANO NO CONTROLE DE *Meloidogyne incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI.

Figura 1. Período de incubação do biocarvão de lodo de esgoto em casa de vegetação, com destaque para período de cultivo do feijão-caupi nos ensaios aos 180 e 360 dias após a aplicação-DAA..... 117

Figura 2. População final de nematoides (ovos + J₂) no sistema radicular (PFNR) de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos de Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) incubado por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA..... 121

Figura 3. Número de nematoides (ovos e J₂) por grama de sistema radicular (NNGR) de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos de Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) incubado por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA..... 122

Figura 4. Variações no fator de reprodução de *Meloidogyne incognita* inoculado em plantas de feijão-caupi, cultivadas em casa de vegetação, com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) incubado por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA..... 123

Figura 5. Sistemas radiculares de plantas de feijão-caupi 90 dias após a inoculação-DAI de *Meloidogyne incognita* em plantas cultivadas em casa de vegetação em vasos de Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) em solo incubado 360 dias após a aplicação-DAA..... 124

RESUMO GERAL

DUARTE, JOÃO LUCAS PIMENTEL. Efeito do Biocarvão de Lodo de Esgoto Sobre *Meloidogyne incognita* em Feijão-caupi. 2022. 155p.

Tese de Doutorado em Fitopatologia - Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

O biocarvão (BC) é um produto sólido, rico em carbono, obtido pela pirólise em temperaturas que variam de 200 °C a mais de 1.000 °C. Diferentes tipos de biomassas, podem ser usadas para tal finalidade, inclusive resíduos, como o lodo de esgoto (LE) que é um resíduo sólido com alto percentual de umidade gerado nas estações de tratamento de esgotos (ETE) e que pode ser um agente de contaminação ambiental, trazendo riscos à saúde humana. Somente no Distrito Federal são gerados em torno de 340 toneladas de LE diariamente, portanto, uma grande quantidade de biomassa muitas vezes desperdiçada. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da aplicação do BC gerado a partir do LE ou BCLE, que surge como uma alternativa para o reaproveitamento desse resíduo urbano, para uso como fertilizante e melhorador de solo no cultivo de feijão-caupi (FC) e como agente de controle quando aplicado ao solo sobre o patossistema FC e *Meloidogyne incognita-Mi*. Foram testadas duas temperaturas de preparo de BC a 300 °C e 500 °C, aplicados em diferentes concentrações de 0,0% a 3,0%, avaliando-se o desenvolvimento e produção das plantas de FC no capítulo-II (CAP.II), bem como, sua influência no controle de *Mi* com a aplicação direta e logo após a semeadura e inoculação de *Mi* (CAP. III), com períodos de incubação no solo antes da semeadura de 180 e 360 dias nas concentrações de 0,0% a 2,0% (CAP. IV). Também foi avaliada a sua influência sobre a microbiota medida por bioindicadores enzimáticos e de qualidade do solo (CAP. V). Os resultados das avaliações mostraram aumentos de C, MO, pH, Ca, Mg, P, CTC, proporcionando maior desenvolvimento e produção das plantas de FC. Reduções de mais de 70% na população do nematoide no sistema radicular do FC com a aplicação direta e reduções de mais de 90% na população de *Mi* após a incubação de 360 dias, tais como aumentos de mais 100% dos teores enzimáticos da arilsulfatase e β -glicosidade e melhoria dos índices de qualidade de solo medidos pela bioanálise. Desse modo, o BCLE se mostrou uma ferramenta eficaz, contra o nematoide, proporcionando melhorias no solo e na planta. Representando uma alternativa na busca pelo aumento da produtividade e da sanidade vegetal com sustentabilidade.

Palavras-chave: Controle alternativo, nematoide-das-galhas, sustentabilidade

Orientador – Prof. Luiz Eduardo Bassay Blum, Ph.D – Universidade de Brasília-UnB;

GENERAL ABSTRACT

DUARTE, JOÃO LUCAS PIMENTEL. Effect of Biochar from Sewage Sludge on *Meloidogyne incognita* in Cowpea. 2022. 155p.

Thesis for the Doctor degree in Plant Pathology – University of Brasilia, Brasilia, DF, Brazil

Biochar (BC) is a solid product, rich in carbon, obtained by pyrolysis at temperatures ranging from 200 °C to over 1,000 °C. Different types of biomasses can be used for this purpose, including residues such as sewage sludge (SS) which is a solid residue with a high percentage of moisture generated in sewage treatment stations (STS) and which can be an environmental contaminant bringing risks to human health. In the Federal District alone, around 340 tons of SS are generated daily, therefore, a large amount of biomass is often wasted. In this sense, the objective of this study was to evaluate the effects of the application of BC generated from SS or SSB, which appears as an alternative for the reuse of this urban waste, for use as fertilizer and soil improver in the cultivation of cowpea-CP and its influence when applied to soil on CP and *Meloidogyne incognita*-*Mi* pathosystem. Two BC preparation temperatures were tested at 300 °C and 500 °C, applied at different concentrations from 0.0% to 3.0%, evaluating the development and production of CP plants chapter II (CH. II), as well its influence on the control of *Mi* control with direct application and soon after sowing and inoculation of *Mi* (CH. III) with incubation periods in the soil before sowing of 180 and 360 days at concentrations of 0.0 % to 2.0% (CH. IV). Its influence on the soil microbiota was also evaluated measured by enzymatic bioindicators and soil quality index (CH. V). The results of the evaluations showed increases in C, OM, pH, Ca, Mg, P, CEC, providing greater development and production of CP plants. Reductions of more than 70% in the nematode population in the root system of the CP with direct application and reductions of more than 90% in the population of *Mi* after the 360-day incubation, as well as increases of more than 100% in the enzymatic levels of arylsulfatase and β -glucosidase and improvement of soil quality indices measured by bioanalysis. In this way, the SSB proved to be an effective tool against the nematode and providing improvements in the soil and in the plant. Representing an alternative in the search for increased productivity and plant health with sustainability.

Keywords: Alternative control, root-knot nematode, sustainability

Major Professor: Prof. Luiz Eduardo Bassay Blum, Ph.D – University of Brasília-UnB

INTRODUÇÃO GERAL

A palavra biocarvão (BC) é uma tradução livre de 'BIOCHAR', uma sigla em inglês derivada da junção das iniciais de duas palavras, 'BIOMASS' (biomassa) e 'CHARCOAL' (carvão). É usada para designar um produto sólido, rico em carbono, obtido pelo aquecimento de biomassa sob condições controladas de oxigenação, em um processo conhecido como pirólise (IBI, 2012). Diferentes tipos de biomassa podem ser usadas para tal finalidade, por exemplo: resíduos orgânicos, restos culturais agrícolas, madeira, esterco de animais (aves, suínos, ovinos e bovinos), restos de frigoríficos e resíduos urbanos (lixo orgânico e lodo de esgoto) (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

De forma que o lodo de esgoto (LE) material utilizado como fonte de biomassa neste estudo, foi um resíduo sólido com alto percentual de umidade gerado nas estações de tratamento de esgotos (ETE). No Distrito Federal-DF são geradas em torno de 340 toneladas dessa biomassa, diariamente (CAESB, 2018). Logo, sua utilização é restrita a poucos usos, pois pode ser um contaminante ambiental dos recursos hídricos e agente de disseminação de patógenos para humanos e animais sendo, portanto, um desafio a adequada destinação do LE pelos gestores públicos, para que esse resíduo não se torne um problema ambiental e de saúde pública (FREDDI, 2019).

Nesse sentido, uma alternativa ao seu uso direto é a proposta para a pirólise e transformação do LE em BC para a utilização na agricultura como fonte de macro e micronutrientes, com a finalidade de promover mudanças na estrutura física, química e na microbiota do solo (ARAUJO et al., 2021). Além disso, há o intuito de aumentar a produtividade das culturas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera em solos do Cerrado (FIGUEIREDO et al., 2019, 2020, 2021).

Atualmente, diversos estudos com biocarvões (BC's) têm surgido, com avanços dos usos desses materiais em diversas áreas. Dessa forma, em estudos fitopatológicos a aplicação de BC de diferentes matérias primas, têm sido propostos para diminuir a incidência de doenças causadas por fitopatógenos transmitidos pelo solo (ELAD et al., 2010; ZWART; KIM, 2012; MEHARI et al., 2015). Sendo também eficaz contra patógenos da parte aérea de algumas espécies vegetais, porém na maioria dos relatos, sua eficiência é maior sobre os patógenos habitantes do solo (BONANOMI, et al., 2018; POVEDA et al., 2021).

Portanto, o objetivo desta tese é avaliar o potencial do biocarvão de lodo de esgoto (BCLE) aplicado ao solo cultivado com a espécie vegetal feijão-caupi [*Vigna unguiculata*

(L.) Walp.] que no Brasil, historicamente, tem a sua produção e consumo maiores nas regiões Nordeste ($1,1 \times 10^6$ ha) e Norte ($55,8 \times 10^3$ ha). Porém, ultimamente esse cultivo tem se expandido na região Centro-Oeste, em razão do desenvolvimento de cultivares com características que favorecem o cultivo mecanizado em grandes áreas (ROCHA et al, 2016).

Contudo, com o aumento da expansão da área de cultivo e da capacidade de adaptação às condições edafoclimáticas, nessa cultura também tem aumentado os problemas fitossanitários, que pode ter sua produtividade reduzida devido à ocorrência de doenças, dentre os quais, a nematose das galhas causada por *Meloidogyne* spp., uma das principais (SOUSA et al., 2021). Com isso, neste estudo serão apresentados dados que demonstram a perspectiva de uma nova alternativa de controle, a um dos principais patógenos do feijão-caupi e de muitas outras plantas cultivadas. Uma alternativa viável e promissora que traz ganhos ambientais, sociais e econômicos aliada à principal vertente da produção rural moderna que é a sustentabilidade.

JUSTIFICATIVA

O lodo de esgoto se não manejado de forma correta, pode vir a trazer riscos à saúde pública e se tornar um agente poluidor ambiental; é um resíduo gerado em grandes quantidades em todo Brasil, todos os dias. Dessa forma, se faz necessária uma avaliação da destinação desse resíduo, transformando-o em biocarvão como um potencial insumo agrícola, de modo a analisar os possíveis ganhos na qualidade do solo e no rendimento da cultura do feijão-caupi e verificar a influência dessa aplicação na redução da infecção de *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949.

OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do biocarvão de lodo de esgoto preparado a partir de diferentes temperaturas de pirólise, quando aplicado em vasos com Latossolo Vermelho em casa de vegetação sobre as propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo e em plantas de feijão-caupi, bem como, determinar a influência dessa aplicação no controle de *Meloidogyne incognita*.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a literatura disponível acerca dos temas abordados neste estudo;
- Avaliar a influência da aplicação do biocarvão de lodo de esgoto em casa de vegetação no desenvolvimento das plantas de feijão-caupi;
- Avaliar a aplicação do biocarvão do lodo de esgoto no solo em casa de vegetação, e as mudanças decorrentes dessa aplicação no solo e na planta, que possam influenciar na infecção de *Meloidogyne incognita* em plantas de feijão-caupi;
- Avaliar a influência do tempo de incubação do biocarvão sobre o patossistema *Meloidogyne incognita*/feijão-caupi;
- Avaliar as mudanças após um ano da aplicação do biocarvão de lodo de esgoto sobre um solo cultivado com feijão-caupi e infestado por *Meloidogyne incognita*.

CAPÍTULO 1

REVISÃO DE LITERATURA

1. O uso do biocarvão na agricultura

A população mundial deve crescer em 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos, passando dos atuais 7,7 bilhões de pessoas para 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2019). Esse aumento da população, requer uma intensificação da produção agrícola em escala global, necessária para garantir o abastecimento de alimentos para uma população mundial crescente (LEHMANN, 2007). Esse aumento da demanda por alimentos, exigirá cada vez mais formas de produções agrícolas centradas na sustentabilidade (WOOLF et al., 2010).

As revoluções agrícola e industrial, combinadas com práticas agrícolas intensivas e insustentáveis a longo prazo, afetaram significativamente o equilíbrio físico, químico e biológico dos solos (SUBEDI et al., 2020). Esse desequilíbrio, ocorre em parte por consequência dos tipos de fertilizantes usados na agricultura moderna, com o uso excessivo de fertilizantes químicos, muitas vezes derivados do petróleo, que aumentam a quantidade e o acúmulo de sais que reduzem a diversidade microbiana no solo (TENIC; GHOGARE; DHINGRA, 2020).

Por outro lado, os carvões vegetais, que geralmente são usados na geração de energia nas indústrias pelo aquecimento de fornos, destinados a diferentes finalidades. Quando usados em granulometrias menores, muitas vezes até como subproduto das indústrias, podem ser uma boa alternativa para a sustentabilidade dos solos dos sistemas agrícolas produtivos (SOHI et al., 2010). Nesse sentido, quando esse carvão é produzido unicamente para finalidade agrícola, chamamos de biocarvão que pode ser usado como um fertilizante ou condicionador do solo (FIGUEIREDO et al., 2020).

No entanto, o surgimento do termo ‘biocarvão’, e a sua utilização como um insumo no solo não é nova, e algumas publicações científicas ocasionais sobre BC’s aplicados aos solos surgiram desde o início do século XX (MAIA; MADARI; NOVOTNY, 2011). Toda essa história, começou em sítios arqueológicos amazônicos, caracterizados por solos escuros com alta fertilidade e potencial agrônômico elevado, o que é incomum quando comparado aos solos circundantes da região, que são altamente

intemperizados, muito ácidos e com fertilidade natural baixa. O primeiro aspecto que chamou a atenção nesses solos, além da cor, foi a sua riqueza em carbono, com quantidades de até 150 g kg⁻¹ de solo, contra 20 a 30 g kg⁻¹ em solos das áreas adjacentes (NOVOTNY et al., 2009).

Desse modo, os estudos sobre as Terras Negras da Amazônia, geralmente, chamadas Terras Pretas de Índios (TPI), renovaram o interesse científico pelo carbono pirogênico nos solos agrícolas (MAIA; MADARI; NOVOTNY, 2011). Atualmente é aceito que as TPI podem remontar a era pré-colombiana e que seu enriquecimento com BC's resultou da atividade de comunidades humanas como fogueiras ou queimadas, mas não está claro até agora, se foi intencional ou não (COSTA; KERN, 1999). O que é aceito atualmente, é que a origem do alto teor de nutrientes desses solos é resultado direto do intenso acúmulo de resíduos orgânicos (plantas ou animais) que foram alterados pela ação do fogo (KERN et al., 2017).

Todavia, as concentrações de fósforo-P, magnésio-Mg, zinco-Zn, cobre-Cu, cálcio-Ca, estrôncio-Sr e bário-Ba são todos elementos representativos da assinatura geoquímica da ocupação humana e sua influência nestes solos (COSTA; KERN, 1999). Desse modo, a ação antrópica desde a era pré-colombiana, vem deixando vestígios cada vez maiores, devido ao crescimento da população, tornando significativos os impactos no meio ambiente. De forma que, reduzir o impacto ambiental per capita das cidades até 2030, melhorando a qualidade do ar, da água e do solo nas gestões de resíduos municipais, é uma das diretrizes da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

A nível nacional, uma redução dos impactos ambientais em função da melhor utilização de resíduos, traria muitos benefícios, entre eles econômicos, possibilitando a geração de insumos por meio de rejeitos no agronegócio brasileiro, que vem se destacando como um dos mais competitivos mundialmente (KERN et al., 2017). Dessa forma, permitiria reduzir os impactos ambientais derivados da destinação incorreta dos resíduos, colaborando com a redução das emissões de carbono ao longo da cadeia produtiva e aperfeiçoando a utilização dos recursos naturais escassos para a agricultura e pecuária nacionais (CRUZ; PEREIRA; FIGUEIREDO, 2017).

Nesse sentido, desde o processo de formação das TPI na Amazônia através da acumulação de resíduos e com uma lenta alteração ambiental, levou aos maiores valores de C, MO, pH, Ca, Mg, P, CTC e saturação por bases, que são elementos e características desejáveis em solos agrícolas e que foram os principais diferenciais quando comparados aos solos circundantes na mesma região (NOVOTNY et al., 2009). Essas características,

demonstram que os solos antropogênicos amazônicos são um grande exemplo, para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para os sistemas de produção agrícola, atuais e futuros, seja localmente ou globalmente (KERN et al., 2017).

Demonstrando, que a pirólise de resíduos, possui um grande potencial na manutenção dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (LAYEK et al., 2022). Portanto, o biocarvão que é um material gerado por pirólise em temperaturas que variam de 200 °C (torrefação) a mais de 1.000 °C, assim como, os bioestimulantes e uma nova geração de fertilizantes orgânicos e organominerais, vem unir à nutrição de plantas cultivadas à preservação dos ecossistemas dos solos (LAFORET, 2013).

Esses produtos permitem economia com insumos químicos, e promovem o reaproveitamento de subprodutos das agroindústrias e de outras fontes de biomassa (SHANG et al., 2022). A pirólise desses resíduos é uma das formas benéficas do aproveitamento desses materiais, que em muitos casos, se não manejados corretamente, podem até ser poluentes ambientais como no caso dos resíduos urbanos como o lodo de esgoto (YUAN et al., 2016).

1.1. Lodo de esgoto na agricultura

A expansão do saneamento básico e da melhoria dos processos de tratamento de esgoto no Brasil, causou um aumento na geração de LE, de modo que as empresas de saneamento enfrentam o desafio de destinar adequadamente esse resíduo (BITTENCOURT; AISSE; SERRAT, 2017). As opções atuais mais viáveis, sob os aspectos ambiental, econômico, técnico e operacional, são o uso agrícola ou disposição em aterro sanitário e/ou industrial que sejam licenciados (GODOY, 2013).

Contudo, critérios e procedimentos para o uso desse material foram estabelecidos, após a publicação da resolução CONAMA nº 375 em 2006, para uso na agricultura com adoção de medidas que possam evitar possíveis contaminações ambientais e danos à saúde humana. O LE também pode conter substâncias inorgânicas e orgânicas poluentes, assim como, agentes patogênicos (Figura 1), com potencial de causar impactos negativos ao ambiente e às populações humanas e animais eventualmente expostas (BITTENCOURT; AISSE; SERRAT, 2017).

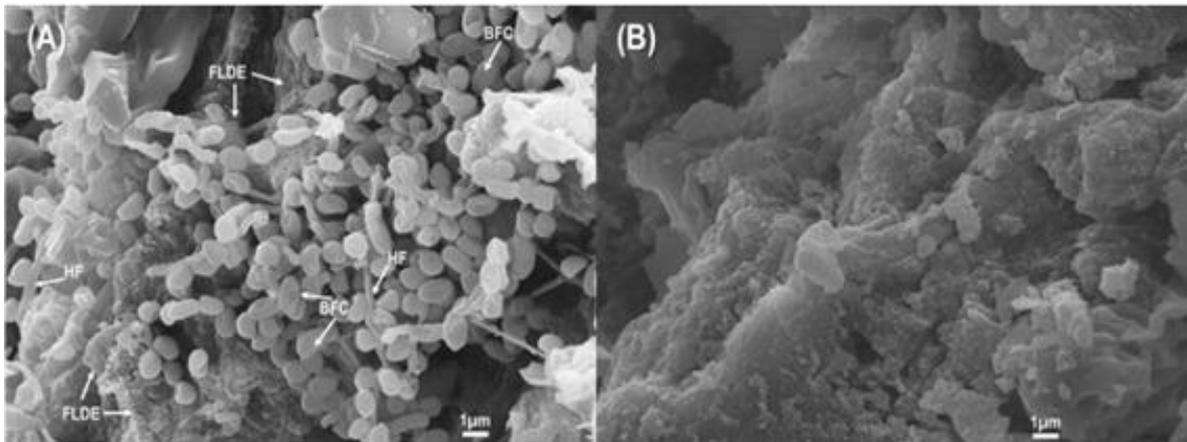


Figura 1. Microscopia Eletrônica de Varredura (barra = 1µm). (A) Fragmento de lodo de esgoto seco ao ar (FLDE) contendo bactérias (BFC) em formato de cocos e hifas (HF) de fungos. (B) Fragmento de biocarvão de lodo de esgoto seco pirolisado a 500°C livre de microrganismos. (J.L.P. Duarte, Laboratório de Microscopia Eletrônicas, Departamento de Biologia Celular, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, UnB, 2021).

Dessa forma, a resolução do CONAMA nº 375 estabeleceu limites máximos de substâncias inorgânicas e de agentes patogênicos que determinam os requisitos mínimos de qualidade desse resíduo. Caso o LE não se enquadre na legislação, devem ser encontrados meios alternativos para que seu uso não seja negligenciado (FACHINI, 2018). A Lei 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, deixando as diretrizes para o sistema de gerenciamento de resíduos, deve obedecer a uma sequência sistemática de prioridades, de forma que um detrito com potencial para reutilização, como o LE por exemplo, não seja de nenhuma forma descartado como rejeito em aterros sanitários (BRASIL, 2010).

1.2. Transformação de lodo de esgoto em biocarvão

Uma alternativa quando não couber o uso direto do LE é a transformação desse resíduo urbano em biocarvão por meio da pirólise, para que seja utilizado na agricultura como fonte de macro e micronutrientes (YUAN et al., 2016b). Em solos do Cerrado, a pirólise desse material vem promovendo aumentos na produtividade das plantas, mudanças na estrutura física e química; influenciando nos aspectos microbiológicos e sendo capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera (FIGUEIREDO et al., 2019, 2020 e 2021).

Esse processamento da biomassa ocorre nos pirolisadores, que são equipamentos capazes de transformar termicamente determinada biomassa, em respectivamente, bio-óleo, bio-gás e biocarvão (LEHMANN; JOSEPH, 2015). O gás gerado nesse processo poderia suprir as necessidades de energia do pirolisador, o bio-óleo que é uma matéria-

prima geradora de energia ($\sim 17 \text{ MJ kg}^{-1}$), pode ser queimada para gerar calor e aquecer fornos na indústria, ou enviada para uma refinaria e ser usada na produção de biocombustíveis (LAIRD, 2008).

Nesse sentido, a pirólise de biomassa é considerada uma forma sustentável para a produção de energia e para a geração de biocarvão (LAIRD, 2008). Diferentes tipos de biomassas, podem ser usadas para tal finalidade, por exemplo: resíduos orgânicos, restos culturais agrícolas, madeira, esterco de animais (aves, suínos, bovinos), restos de frigoríficos, resíduos urbanos (lixo orgânico, lodo de esgoto), entre outros (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

No caso do lodo de esgoto (LE) que foi o material utilizado neste estudo, uma estimativa de geração desse resíduo no Brasil, considerando que 42,7% dos esgotos produzidos são tratados, em uma população de 200 milhões de habitantes, isso representaria 88,3 milhões de habitantes com acesso ao tratamento de esgoto (MARTINS et al., 2021). Portanto, a estimativa em volume per capita de LE líquido a ser tratado no país é de 1 a 4 L/hab.dia⁻¹, dessa forma, diariamente seriam gerados de: 88.000 a 353.000 m³/dia de LE líquido, a ser tratado. Em relação a esse resíduo na fase sólida, levando-se em consideração a geração da quantidade mínima per capita nas estações de tratamentos que é de 0,1 a 0,15 L/hab.dia⁻¹, seriam gerados e armazenados entre 8.800 a 13.200 m³/dia de LE sólido no país (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES 2010).

Com essa enorme quantidade de biomassa muitas vezes desperdiçada, o biocarvão (BC) de LE ou (BCLE) surge como uma solução, para problemas emergentes e urgentes, sendo uma maneira rápida, barata e oportuna de estocar carbono e melhorar a qualidade do solo para algumas áreas agrícolas no futuro, podendo ainda ter outros benefícios ainda não explorados, mas que já estão sendo pesquisados, como no caso deste estudo.

1.3. Efeito do biocarvão em fitopatógenos

Um solo, ou mesmo um composto supressor, pode fornecer um ambiente no qual o desenvolvimento de doenças em plantas é reduzido, até quando o patógeno é favorecido pela presença de um hospedeiro suscetível (HADAR; PAPADOPOULOU, 2012). Partindo desse pressuposto, com os avanços dos estudos dos BC's e os seus benefícios para a agricultura na última década; houve um impacto intrigante para o entendimento da adição do BC ao solo e a sua capacidade de afetar a resistência das plantas a doenças em diferentes patossistemas (MEHARI et al., 2015).

Com isso, os estudos fitopatológicos a partir do uso de BC's iniciaram as primeiras

avaliações e indicaram alterações no solo e na planta, de forma que a aplicação do BC diminuiu a incidência de doenças causadas por fitopatógenos do solo e da parte aérea (ELAD et al., 2010; ZWART; KIM, 2012). Em uma revisão, onde foram avaliadas as pesquisas sobre a supressão de doenças em plantas pela adição de diferentes tipos de BC's, uma meta-análise de 61 estudos de casos experimentais, constatou que percentualmente os efeitos da adição, promoveram uma alteração supressiva em 85% dos casos, não ocorrendo diferença significativa em 12% e em apenas 3% dos estudos analisados foram relatados um aumento significativo da incidência da doença (BONANOMI; IPPOLITO; SCALA, 2015).

Para as possíveis causas de supressão da infecção de patógenos, ou mesmo a redução de danos ocasionados nas plantas hospedeiras, foram propostos diferentes mecanismos para explicar a supressão de doenças em função do uso do biocarvão. Dentre todos os mecanismos, destacam-se cinco: (i) indução de resistência sistêmica em plantas hospedeiras; (ii) maior diversidade e atividades de microrganismos benéficos, incluindo fungos micorrízicos; (iii) modificação da qualidade do solo em termos de disponibilidade de nutrientes e condições abióticas, tais como aumento da porosidade e retenção de água; (iv) efeito tóxico direto do biocarvão; (v) adsorção de compostos fitotóxicos que poderiam danificar diretamente as raízes das plantas, e assim promover ataques de patógenos (BONANOMI; IPPOLITO; SCALA, 2015; HUANG et al., 2015; EGAMBERDIEVA et al., 2016; GEORGE; KOHLER; RILLIG, 2016; BONANOMI et al., 2018, POVEDA et al., 2021).

Portanto, considerando a pressão generalizada dos consumidores para reduzir o uso de defensivos químicos na agricultura e o crescente interesse em utilizar o biocarvão no solo para fins de sequestro de carbono, o desenvolvimento de mercados agrícolas para utilização do BC como um agente de controle de doenças, poderia ajudar a promover a adoção da pirólise da biomassa de resíduos como uma das ferramentas no combate às mudanças climáticas causadoras do aquecimento global e trazendo benefícios ambientais, sociais e econômicos.

O BC é inicialmente um material estéril (Figura 1) e mesmo que aplicado ao solo, esse material não tem uma população de microrganismos nativos que possa potencializar a supressão de doenças, como ocorrem em solos naturalmente supressivos. No entanto, pode influenciar as populações e comunidades microbianas nativas a exercer esse papel (WALKIEWICZ et al., 2020). Essas mudanças, que a adição de BC ao solo proporciona, podem influenciar um aumento nos microrganismos benéficos à planta que atuam,

protegendo diretamente a hospedeira e que são antagonistas aos patógenos do solo (JAISWAL et al., 2019).

Esses microrganismos antagonistas atuam produzindo antibióticos, que podem inibir patógenos ou aumentar rapidamente a sua população, competindo com a população de microrganismos patogênicos, por nutrientes ou espaço (JOSEPH et al, 2021). Além disso, compostos químicos como os alcatrões, que permanecem em alguns BC's, principalmente os que tem como matéria prima resíduos de madeira, quando adicionados ao solo podem ter efeitos tóxicos diretos sobre os patógenos do solo (GRABER et al., 2010).

Portanto, a qualidade da biomassa de resíduos inicial que será pirolisada como: restos de colheita de diferentes culturas (palhadas), madeira, lixo orgânico urbano, lodo de esgoto, esterco e ossos de diferentes animais, bem como, as condições de pirólise (temperatura e disponibilidade de oxigênio) podem alterar profundamente o perfil químico do BC (LEHMANN; JOSEPH, 2015). Porém, mesmo com BC de diferentes matérias primas, existem vários relatos de supressão de fitopatógenos como: *Fusarium* spp., *Phytophthora* spp., *Rhizoctonia solani* Kühn, *Meloidogyne graminicola* Golden & Birchfield, 1965, *Pratylenchus penetrans* (Cobb, 1917) Filipjev & Schuurmans Stekhoven, 1941, após a aplicação do BC ao solo (BONANOMI et al., 2018).

Em relação aos fungos patógenos de solo, com a aplicação do BC 'C. QUEST' (produto comercial) em solo cultivado com *Asparagus officinalis* L., houve redução na infecção causada por fusariose (*Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi* Cohen e *Fusarium proliferatum* (Matsush) Nirenberg ex Gerlach & Nirenberg), em que os mecanismos propostos para a supressão da doença foram a adsorção de compostos fitotóxicos e o aumento da colonização por fungos micorrízicos arbusculares (ELMER; PIGNATELLO, 2011). De maneira indireta, foi verificado também a supressão de uma fusariose (*F. oxysporum* f.sp. *asparagi*), em *A. officinalis* cv. Mary Washington 500 W com a aplicação de um BC de casca de coco (MATSUBARA; HASEGAWA; FUKUI, 2012).

Houve supressão também de doenças causadas por oomicetos como: *Phytophthora cactorum* (Lebert & Cohn) Schröet em *Acer rubrum* L. e *Phytophthora cinnamomi* Rands em *Quercus rubra* L., que são espécies florestais exploradas comercialmente em alguns países, com a aplicação de BC de madeira de *Pinus* spp., que foram pirolisadas na temperatura de 550 °C e 600 °C, onde os autores afirmam que o mecanismo de supressão foi a indução de resistência nas plantas (ZWART; KIM, 2012). Com a aplicação de BC de resíduo de ossos de suínos, pirolisados a 550 °C, também

houve a supressão de *Phytium aphanidermatum* (Edson) Fitzp em tomateiro, através do carreamento de agentes de controle biológico pelo BC (POSTMA et al., 2013).

Como também, sem que o mecanismo de supressão do BC de madeira de eucalipto pirolisada a 350 °C e 600 °C fosse identificado e sem que houvesse um efeito fungitóxico direto sobre o patógeno, foi verificada uma supressão de *Rhizoctonia solani* em *Cucumis sativus* L. cv. Muhasan (JAISWAL et al., 2014). E ainda, com o mesmo BC citado anteriormente e o mesmo patógeno *R. solani* houve supressão da doença causada em feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). Porém, há casos também em que o BC de palhada de *Miscanthus* spp. Andersson não causou efeito sobre a hérnia das crucíferas, causada por *Plasmodiophora brassicae* Woronin em *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis*.

Em doenças de etiologia bacteriana, a aplicação de BC de madeira de *Pinus* spp., na concentração de 3,0% foi capaz de diminuir a incidência em 19,9%. Com o uso de BC em partículas de diferentes granulometrias houve maior eficiência na capacidade de adsorção dos exsudatos radiculares, enquanto, que o BC de menor granulometria foi 91% mais eficiente na adsorção do patógeno (GAO; DELUCA; CLEVELAND, 2019). Nesse sentido, em bacterioses em que os patógenos permanecem no solo em algum período do ciclo de vida, o BC foi capaz de reduzir a mobilidade dos patógenos, diminuindo a colonização patogênica na rizosfera (GU et al., 2017).

O uso do BC também é capaz de reduzir nematoses, com a aplicação de BC preparado de quatro tipos de resíduos diferentes: apenas a casca de *P. sylvestris* L., restos de caixas de madeira de coníferas e palhada de trigo vermelho (*Triticum spelta* L.), que foram pirolisados a 500°C e aplicados na concentração de 5,0% no patossistema cenoura (*Daucus carota* L.) e o nematoide das lesões radiculares (*Pratylenchus penetrans*), onde com exceção do BC de madeira de pinho, todos os outros BC's reduziram significativamente as taxas de infecção do nematoide nas raízes secundárias e principal, em aproximadamente 80% e o BC da palhada de *T. spelta* reduziu as taxas de infecção em mais de 96% (GEORGE; KOHLER; RILLIG, 2016).

Os autores do estudo citado anteriormente, afirmam que provavelmente o BC seja capaz de induzir uma resposta de defesa, seja por RSA ou RSI, em plantas de cenoura para combater infecções por *P. penetrans*. Contudo, o BC também foi relatado na supressão de outra nematose, causada pelo nematoide-das-galhas (*Meloidogyne graminicola*) em arroz (*Oryza sativa* L.) cv. Nipponbare; com a aplicação de BC 1,2% adicionado ao solo, em que essa concentração foi considerada a mais eficaz na redução do desenvolvimento de nematoides nas raízes de arroz, enquanto os efeitos tóxicos diretos

do BC sobre a viabilidade, infectividade ou desenvolvimento do nematoide não foram observados (HUANG et al., 2015).

Nesse estudo, o aumento da resistência das plantas de arroz foi associado ao acúmulo de H₂O₂, que é uma espécie reativa do oxigênio essencial para a indução de respostas de defesa em plantas, bem como, o aumento da transcrição de genes envolvidos na via de sinalização do etileno (ET). Nesse estudo, como houve a ocorrência de maior suscetibilidade na linhagem de arroz *Ein2b-RNAi*, que possui uma mutação, na sinalização de ET, os autores afirmam que o BC atuou induzindo a resistência, pelo menos de forma parcial através da sinalização do ET nas plantas de arroz em resposta à infecção de *M. graminicola* (HUANG et al., 2015).

Uma das teorias atualmente aceitas, para explicar os casos, em que não é relatada a indução de resistência com a aplicação do BC para a supressão de doenças no solo, é que durante a pirólise da biomassa, o rápido desaparecimento de fontes de carbono facilmente degradáveis e o enriquecimento de frações aromáticas tornam o BC um material orgânico capaz de estimular o crescimento das plantas, mas não de atuar como base alimentar para microrganismos antagonistas (BONANOMI et al, 2018). Em vez disso, sua estrutura porosa (Figura 2) pode sustentar fisicamente as colônias de microrganismos antagonistas do solo, fornecendo locais não acessíveis a predadores, como ácaros, colêmbolas, protozoários e nematoides, o que induz o aumento da população em detrimento da população de patógenos (LEHMANN et al., 2011).

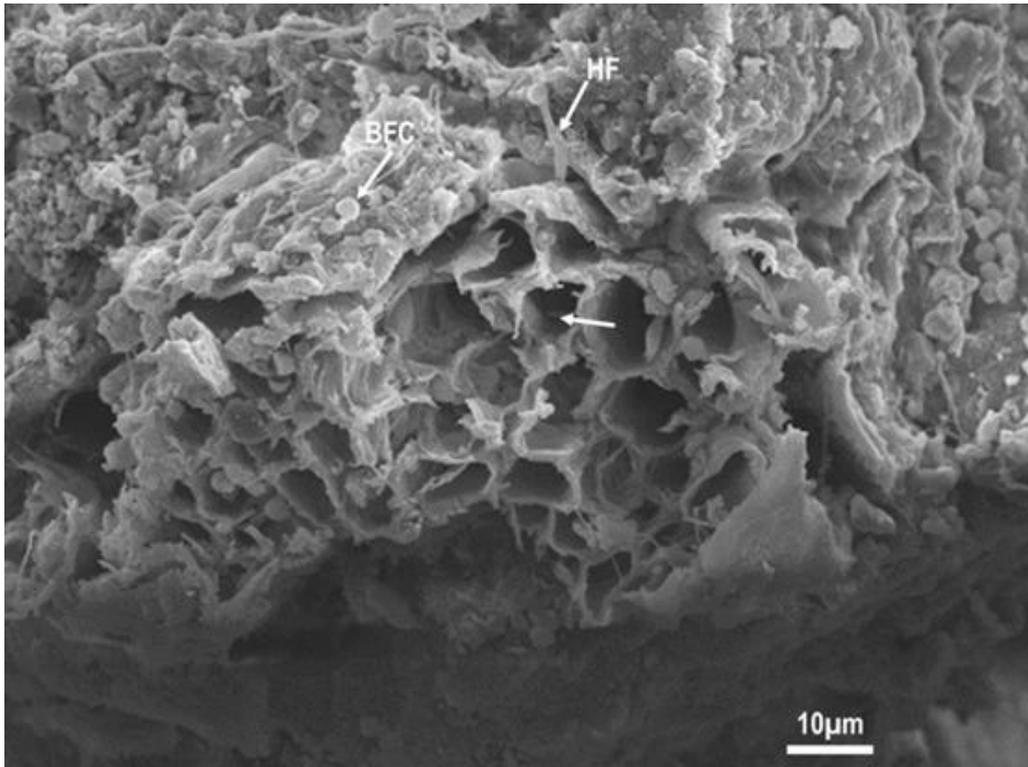


Figura 2. Microscopia Eletrônica de Varredura (barra = 10 μ m). Fragmento de biocarvão de lodo de esgoto (BLE) seco pirolisado a 300°C mostrando vestígios de bactérias de formato cocos (BFC), poros (seta) e fragmentos de hifas fúngicas (HF). (Foto – J.L.P. Duarte, Laboratório de Microscopia Eletrônica, Departamento de Biologia Celular, Instituto de Ciência Biológicas, Universidade de Brasília, UnB, 2021).

O BC induziu resistência sistêmica a doenças em plantas causadas por alguns patógenos fúngicos foliares que empregam uma variedade de estratégias de infecção (necrotróficas, biotróficas e semibiotróficas), inclusive para patógenos que não possuem nenhuma parte do ciclo de vida no solo (MEHARI et al., 2015). No primeiro relato de controle de doenças com a aplicação de BC, verificou-se que a gravidade das doenças fúngicas foliares causadas por *Botrytis cinerea* Pers. Ex Fries e *Oidiopsis sicula* Rajd em tomate (*Solanum lycopersicum* L.), e em pimenta (*Capsicum annum* L.) cv. Maccabi foi reduzida significativamente com a aplicação de BC de madeira de árvores de citros (ELAD et al., 2010).

Portando, apesar de aplicado ao solo, o BC mostrou eficácia experimental, contra patógenos da parte aérea em algumas espécies vegetais (MEHARI et al., 2015). Na cultura do morango, a utilização de BC de resíduos de poda de plantas cítricas, preparado a 450 °C e aplicado ao solo suprimiu significativamente as doenças: mofo cinzento causadas por *Botrytis cinerea*, a antracnose causada por *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds e o oídio [*Podosphaera aphanis* (Wallr.) U. Braun], var. *aphanis*, os autores afirmam que o BC impulsionou uma regulação positiva dos genes relacionados com a

defesa antes e após a infecção (HAREL et al., 2012). Também houve redução para o mofo cinzento *B. cinerea*, porém dessa vez na cultura do tomate com a aplicação de BC de restos culturais de hortaliças preparado a 450 °C (MEHARI et al., 2015).

Nesse sentido, em estudos como esses, os autores relacionaram as supressões das doenças em função da capacidade do BC em induzir uma resistência na planta hospedeira, potencializando as respostas de defesas em todas as partes da planta (JAISWAL et al., 2020). Em geral, essa resistência tem dois caminhos principais, o sistema mais amplo de resistência induzida (RSI), desencadeada por microrganismos promotores de crescimento de plantas, em geral fungos e bactérias, considerada mais ampla, pois depende da interação de alguns hormônios vegetais como: etileno (ET), ácido jasmônico (AJ) e metil jasmonato (MeJA); e a forma mais restrita, a resistência sistêmica adquirida (RSA), que começa com uma reação de hipersensibilidade (RH) levando à necrose local e que envolve a síntese de proteínas relacionadas à patogênese (PR), mediada por um único hormônio vegetal, o ácido salicílico (AS) (VALLAD; ROBERT, 2004).

Contudo, a resistência sistêmica induzida também foi considerada como parte do mecanismo de supressão de doenças através da aplicação do BC para doenças de etiologia fúngica na maioria dos relatos. No entanto, mesmo com o aumento dos estudos da interação do BC com diferentes patossistemas até o momento, poucos estudos forneceram suporte científico para a confirmação dessa hipótese (BONANOMI et al., 2018; JAISWAL et al., 2020; POVEDA et al., 2021).

1.4. O nematoide-das-galhas *Meloidogyne* spp.

Os nematoides do gênero *Meloidogyne* Göldi, 1887 conhecidos popularmente por nematoides-das-galhas, são parasitas obrigatórios de plantas que estão distribuídos em todo o mundo. O gênero possui 98 espécies que parasitam quase todas as espécies de plantas vasculares (JONES et al., 2013). O nome popular nematoide-das-galhas vem de alterações morfológicas, que são deformações nas raízes, induzidas pelo patógeno na planta hospedeira. Dentre as várias espécies desse gênero, *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949 (*Mi*) é uma das espécies mais importantes em zonas de clima tropical; tendo em vista sua ampla polifagia, sendo somente no Brasil mais de 250 espécies hospedeiras (CARNEIRO et al., 2016).

Com presença na maioria das regiões do planeta, esses nematoides podem atacar as raízes de mais de 3.000 culturas agrícolas, desempenhando um papel vital na predisposição das plantas hospedeiras à invasão por outros patógenos secundários,

resultando em perdas significativas de rendimento (HASHEM; ABO-ELYOUSR, 2011). Segundo estimativas, cerca da metade dos cultivos em estufas estão infectados com *Mi* com uma perda anual estimada em mais de 400 milhões USD (HUANG et al., 2014).

A sua alta capacidade de infecção e a grande variabilidade genética, possuindo quatro raças diferentes (1, 2, 3 e 4), que são caracterizadas por atacar diversas espécies de plantas é um fator que destaca em relação a essa espécie (SASSER, 1980). Porém, outras espécies desse gênero podem ser importantes como o *M. arenaria* (Neal, 1889) Chitwood, 1949, *M. javanica* (Treub, 1885) Chitwood, 1949 e nas zonas de clima temperado têm-se o *M. hapla* Chitwood, 1949 (MOENS; PERRY; STARR, 2009).

Outra espécie deste gênero vem ganhando importância no Brasil e no mundo é *M. enterolobii* Yang & Eisenback, 1983, e que não é controlada pelas mesmas fontes de resistência que as outras espécies de *Meloidogyne* (CARNEIRO et al., 2012). Além disso, o cultivo difundido de plantas resistentes a outras espécies de nematoides-das-galhas, pode criar uma pressão de seleção a favor de *M. enterolobii*, aumentando futuramente a importância desta espécie (DINIZ et al., 2016).

Apesar de serem patógenos radiculares, os sintomas de infecção causados por esses nematoides, podem ser observados na parte aérea das plantas (RALMI; KHANDAKER; MAT, 2016). Plantas infectadas em graus elevados, apresentam sintomas de murcha, dada a limitada capacidade de absorção das raízes com galhas, comprometendo o transporte de água e nutrientes. Essa deficiência na absorção, pode ocasionar deficiências nutricionais em função da reduzida capacidade de absorver e transportar nutrientes a partir da solução do solo, causando nanismo e queda na produção da planta (SIDDIQUE; GRUNDLER, 2018).

Portanto, os sintomas diretos provocados por *M. incognita* são: formação de galhas, redução no volume do sistema radicular, rachaduras em tubérculos que podem causar o desencadeamento dos sintomas indiretos como, deficiências nutricionais nas plantas atacadas, murcha das plantas, desfolhas e reduções na produtividade (MUKHTAR; KAYANI, 2020).

1.4.1. Ciclo de vida de *Meloidogyne* spp.

As fêmeas maduras desovam em uma matriz gelatinosa protetora que forma uma massa de ovos. Esses ovos são encontrados na superfície da raiz ou podem estar no interior dos tecidos vegetais, sendo que essas massas de ovos podem conter até 1.000 ovos (JONES et al., 2013). Após a embriogênese, ainda dentro do ovo o juvenil de

primeiro estágio (J_1) se transforma em juvenil de segundo estágio (J_2), que é o estágio infeccioso (Figura 3).

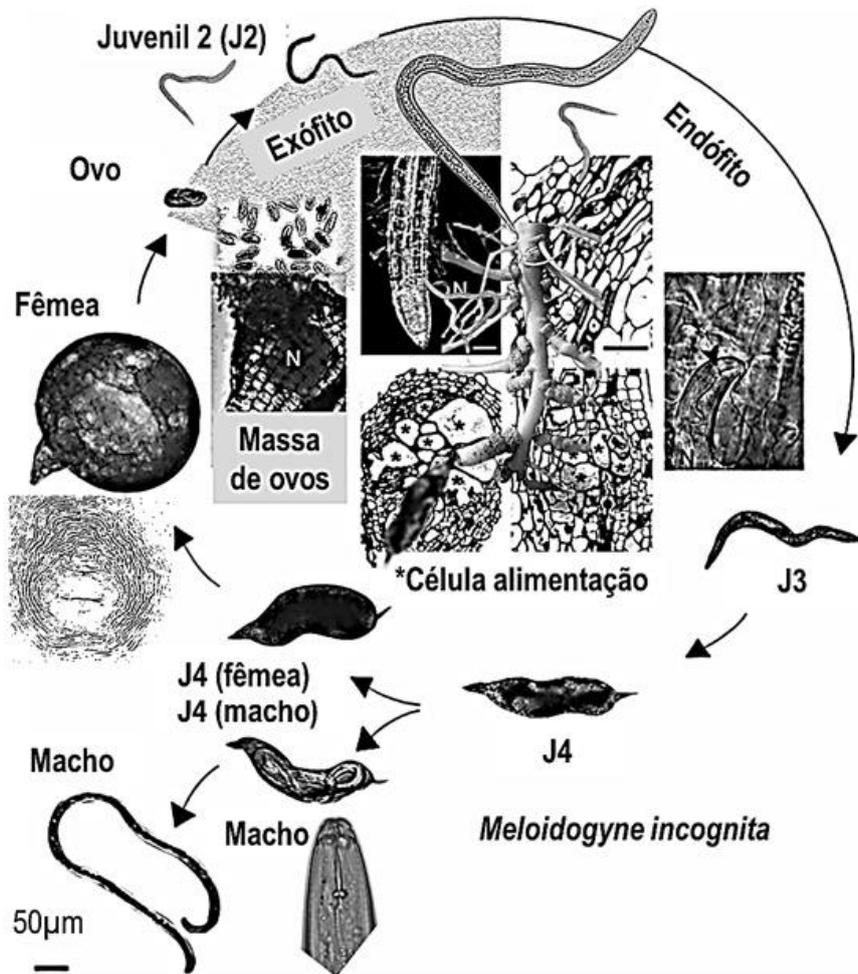


Figura 3. Ciclo de vida de *Meloidogyne incognita*. (Fonte: Adaptado de Abad et al., 2008).

Os nematoides na fase de J_2 , após saírem dos ovos se tornam móveis e migram no solo até que geralmente penetram nas pontas das raízes, apesar de poderem penetrar em qualquer local (ABAD et al., 2008). Para facilitar a penetração, o J_2 usa uma combinação de dano físico e químico, por meio do impulso do estilete que é ligado ao esôfago, quebrando a parede celular e liberando enzimas celulolíticas e pectolíticas (JONES et al., 2013). Após a penetração, o J_2 inicia a formação de um local de alimentação permanente estabelecendo o sítio de alimentação no cilindro central, na zona de alongação celular da raiz, que consiste em várias células gigantes multinucleadas formadas por endomitoses sucessivas. Essas células funcionam como sumidouros especializados, fornecendo nutrientes ao agora sedentário J_2 , que ficará com a cabeça inserida na periferia do tecido vascular (RALMI; KHANDAKER; MAT, 2016).

No caso do nematoide-das-galhas, a proliferação do tecido ao redor do nematoide e das células gigantes leva à formação da típica galha, observada como sintoma primário da infecção (MOENS; PERRY; STARR, 2009). Após a formação do sítio de alimentação o nematoide retira grandes quantidades de nutrientes da planta, destinados ao desenvolvimento e multiplicação do patógeno, induzindo uma patologia na planta, que causa a distribuição deficitária dos produtos fotossintéticos, refletindo na redução do crescimento e da produção da planta (SIDDIQUE; GRUNDLER, 2018).

No processo de alimentação, o J₂ se torna sedentário e muda de tamanho por três vezes, estádios (J₃, J₄) e (adulto) quando atinge o estágio reprodutivo (Figura 4). Os estádios J₃ e J₄ não têm um estilete funcional e não são capazes de se alimentar (ABAD et al., 2008). Apenas as fêmeas adultas continuam se alimentando e aumentando de tamanho, até adquirir o formato piriforme e os machos que são vermiformes deixam a raiz e migram para o solo (JONES et al., 2013).

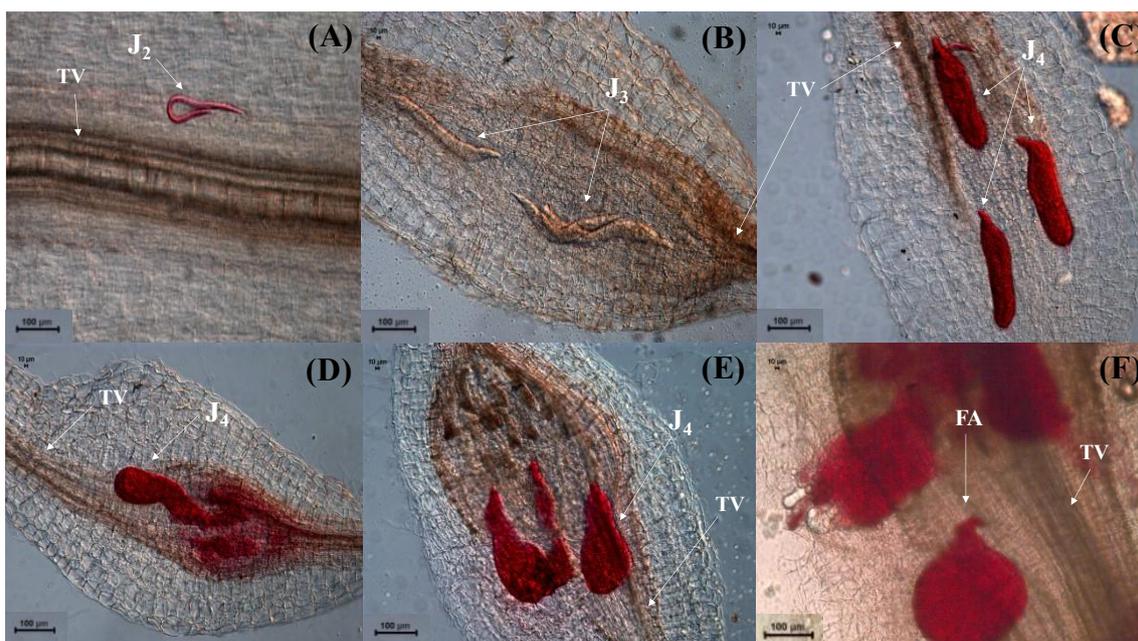


Figura 4. Raízes de feijão-caupi inoculadas com *Meloidogyne incognita*. Nematoides em diferentes estádios de desenvolvimento do seu ciclo de vida no interior do tecido radicular da planta, corados com fucsina ácida pelo método de Byrd et al. (1983). (A) estágio J₂ (06 dias após a inoculação – DAI), (B) estágio J₃ (09 – DAI), (C) estágio J₄ (12 – DAI), (D) estágio J₄ (15 – DAI), (E) estágio J₄ (18 – DAI), (F) fêmea adulta (25 – DAI). ¹TV: Tecido vascular da raiz, J₂: Juvenil de segundo estágio, J₃: juvenil de terceiro estágio, J₄: juvenil de quarto estágio, FA: fêmea adulta. (Foto – T. F. SILVA, Laboratório de Nematologia, Departamento de Fitopatologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília - UnB, 2021).

Os nematoides-das-galhas, geralmente têm proporções sexuais desequilibradas, com maior formação de fêmeas; possuindo uma capacidade excepcional de estratégias reprodutivas, variando da anfimixia que é a reprodução sexuada, à partenogênese mitótica

que é uma forma de reprodução assexuada (CHITWOOD; PERRY, 2009). Nesse sentido, a maioria das espécies é partenogenética e os machos são formados apenas em condições adversas (HUSSEY; JANSSEN, 2009).

Várias espécies de *Meloidogyne* têm uma ampla gama de hospedeiros, e em geral, a eclosão depende apenas das condições adequadas de temperatura e umidade, sem a necessidade de estímulo de plantas hospedeiras (MALHERBE; MARAIS, 2015). No entanto, em alguns casos, a difusão de exsudatos, pela raiz da hospedeira e o número de gerações dentro de uma estação de cultivo, pode influenciar a resposta de incubação e infecção do nematoide na planta (CURTIS et al., 2009).

A habilidade de *Meloidogyne* spp. de sobreviver é aumentada por várias adaptações fisiológicas e bioquímicas, incluindo o retardar na embriogênese, quiescência, diapausa, como também, reservas de lipídios que prolongam a viabilidade do patógeno, até que o J₂ alcance e invada a raiz de uma hospedeira; no solo, o J₂ é vulnerável e os nematoides nesse estágio, são atraídos pelas raízes e precisam localizar uma hospedeira o mais rápido possível (SIDDIQUE; GRUNDLER, 2018). Há evidências de que quando as raízes das plantas resistentes e suscetíveis estão presentes, as suscetíveis são mais atrativas (MOENS; PERRY; STARR, 2009).

1.4.2. Princípios e medidas de controle de *Meloidogyne* spp.

Os nematoide-das-galhas, causam grandes prejuízos à agricultura moderna, existindo diversas maneiras para o controle desse patógeno (ELLING, 2013; JONES et al., 2013). Dentre os princípios de controle existentes, os mais utilizados são, o controle cultural, proteção, erradicação, exclusão e imunização (resistência). Dentro do princípio de controle cultural, a rotação de culturas, uso de plantas de cobertura não hospedeiras, uso de plantas antagonistas, o ‘ROGUING’ que consiste na retirada de plantas daninhas ou cultivadas não desejáveis nos campos agrícolas; tornam-se as práticas mais adotadas pelos agricultores (DESAEGER; WATSON, 2019).

No Brasil, entre as medidas de controle via erradicação destacam-se o alqueive, que consiste na manutenção da área de cultivo limpa, e a exposição da área a radiação solar direta por um período antes do plantio, com arações e gradagens periódicas. O cultivo de plantas não hospedeiras, no caso de alta infestação do nematoide como a formação de reboleiras no campo, e da disponibilidade de mais áreas para o plantio é indicada, a rotação com gramíneas: Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) e braquiárias (*Brachiaria decumbens* Stapf e B.

ruziziensis Germain et Everard), por no mínimo 2 anos enquanto utilizam outra área para o cultivo (DEBIASI, et al., 2016; DJIAN-CAPORALINO et al, 2019).

A rotação com plantas antagonistas e armadilhas também é uma prática de controle via erradicação, que tem mostrado resultados expressivos na redução dos níveis populacionais de nematoides em diferentes culturas (CLAUDIUS-COLE; FAWOLW; COYNE, 2014). A mamona (*Ricinus communis* L.) para pequenas áreas, as crotalárias, especialmente *Crotalaria spectabilis* L. e *C. breviflora* L. e o cravo-de-defunto (*Tagetes patula* L., *Tagetes minuta* L., *Tagetes erecta* L.), são exemplos de plantas utilizadas em rotação de culturas com sucesso no controle dos nematoides-das-galhas (PATEL; DHILLON, 2017).

Entre as medidas de controle a imunização, também conhecida por resistência genética ou controle genético, que consiste no uso de variedades resistentes é considerado um dos métodos mais essenciais para o controle desses nematoides (SANTOS et al., 2018). O controle genético é uma importante ferramenta no manejo integrado de doenças, pois o uso de cultivares ou porta-enxertos resistentes constitui um método de controle fácil, barato e não poluente (HUYNH et al., 2016).

Dentro dos princípios da erradicação e proteção está o controle químico, através da aplicação de nematicidas, usados para controlar os nematoides e que podem ser divididos em dois tipos: nematicidas não fumigantes, nematicidas fumigantes (NOLING, 2012). A fumigação do solo, por muitos anos foi a maneira mais eficaz e confiável para controlar os patógenos de solo nas culturas, entre eles as espécies de *Meloidogyne*, principalmente em estufas e casa de vegetação (HUANG et al., 2018). O brometo de metila foi um fumigante amplamente utilizado para o controle de nematoides, até que foi eliminado globalmente sob o Protocolo de Montreal devido à sua capacidade de danificar a camada de ozônio (UNEP, 2000).

Após a eliminação do brometo de metila, houve maior adoção de nematicidas não fumigantes, principalmente aqueles que possuem princípios ativos pertencentes aos grupos dos organofosforados e carbamatos (COLLANGE et al., 2011). Entre outros produtos estão aqueles à base de abamectina, um dos princípios ativos mais utilizados atualmente (HUANG et al., 2014). Para uma maior eficiência dos nematicidas não fumigantes, os produtos precisam ser aplicados via tratamento de semente ou uniformemente distribuídos no solo, entre cinco e dez centímetros de profundidade (RALMI; KHANDAKER; MAT, 2016).

No Brasil, as principais formas de aplicação de nematicidas são na forma de tratamento de sementes, ou na incorporação pré-plantio de sementes ou mudas, de produtos à base de cadusafos, carbofuran, fluensulfone, fluopyram e abamectina que são aplicados em diferentes concentrações e dosagens (MACHADO et al., 2020). Outro fator importante, é que os nematicidas fumigantes ou não fumigantes, têm a capacidade de atingir microrganismos do solo atuando também sobre organismos não-alvo, que podem ter atuação benéfica para os cultivos (IBEKWE et al., 2010).

Portanto, há uma busca de alternativas ao controle químico, como a utilização de organismos de controle biológico (OCB), que consistem em microrganismos antagonistas a esses patógenos. Existem quatro grupos desses OCB: endoparasitas, predadores, produtores de metabólitos tóxicos e parasitas de ovos e fêmeas. Os fungos endoparasitas produzem zoósporos ou hifas que aderem à cutícula do nematoide hospedeiro e se alimentam do conteúdo pseudocelomático como *Purpureocillium lilacinum* (Thom) Luangsa-ard, Hou- braken, Hywel-Jones & Samson [= *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson], que coloniza apenas formas imóveis dos patógenos (ovos e fêmeas) penetrando através da cutícula de nematoides por meio da produção das enzimas líticas como serina, protease e quitinase (KHAN; WILLIAMS; NEVALAINEN, 2004).

Existe uma forma de maior ocorrência natural que são os nematoides predadores que se alimentam de organismos do solo, incluindo os nematoides parasitas de plantas. Reduzindo as populações de nematoides parasitas nos solos e ainda liberam nutrientes em formas disponíveis para as plantas, o que pode permitir que as plantas suportem melhor a infecção por nematoides parasitas em suas raízes. A predação por nematoides das ordens Mononchida, Diplogasterida, Dorylaimida e Aphelenchida já foi estudada, mas os dados disponíveis em condições naturais/de campo, são insuficientes para concluir se são agentes de biocontrole eficazes para nematoides fitoparasitas (KHAN; KIM, 2007).

Os organismos produtores de metabólitos tóxicos aos nematoides, exercem efeito sobre a eclosão, mobilidade e capacidade de penetração dos nematoides no hospedeiro. Destacando-se várias espécies de fungos do gênero *Trichoderma* Pers., como: *T. harzianum* Rifai, *T. virens* (J.H. Mill., Giddens & A.A. Foster) Arx, *T. viride* Pers., *T. asperellum* Samuels, Lieckf. & Nirenberg, *T. atroviride* P. Karst e *T. longibrachiatum* Rifai. Há outros fungos que também atuam liberando metabólitos tóxicos, com ação nematicida capazes de inviabilizar ovos e matar indivíduos adultos, alguns são conhecidos como leveduras *Pichia guilliermondii* (Wick.) Kurtzman & M. Suzuki, *Candida albicans* (C.P. Robin) Berkhout e *Geotrichum terrestre* Link (FAN et al., 2002).

Há também bactérias antagônicas promissoras para o controle biológico, pertencentes aos gêneros *Bacillus* Conhn e *Pseudomonas* Migula que geralmente são bactérias saprófitas. Elas agem produzindo proteases que destroem a cutícula dos nematoides como: *Pseudomonas fluorescens* Migula, e muitas espécies de *Bacillus*, com destaque para *B. subtilis* (Ehrenberg) Cohn (ARAÚJO; MARCHESI, 2009). E há até algas capazes de produzir antibióticos e metabolitos secundários, capazes de controlar esses nematoides como *Calothrix parietina* Thuret ex Bornet & Flahault (HASHIM; ABO-ELYOUSR, 2011).

Entretanto, para o controle de *Heterodera glycines* Ichinohe, 1952 e *Meloidogyne* spp. as bactérias de maior sucesso incluem aquelas formadoras de endosporos como *Pasteuria penetrans* (ex Thorne) Sayre & Starr e *Pasteuria nishisawe* Sayre, que já possuem até defensivos biológico registrados com essas bactérias para o controle desses nematoides. Portanto, diversas medidas são utilizadas para o controle de nematoides do gênero *Meloidogyne* (Tabela 1). Cada medida de controle é escolhida de acordo com a cultura, tamanho da propriedade rural, sistema de cultivo (convencional ou orgânico), dentre outros fatores. Neste estudo, serão apresentados os resultados de uma nova alternativa para o controle desses nematoides, que pode se somar a algumas medidas citadas anteriormente, podendo se tornar mais uma ferramenta para um manejo eficiente e redução dos danos causados por esse grupo de patógenos.

Tabela 1. Princípios de controle associados ao nematoide-das-galhas (adaptado de MOENS; PERRY; STARR, 2009).

Exclusão	Proibindo, frequentemente por regulamentos governamentais, a entrada do patógeno em uma região ou local onde ele não existe (barreiras sanitárias, lavagem de máquinas e implementos agrícolas);
Erradicação	A remoção completa ou parcial do patógeno de uma região, local ou campo de produção (fumigação do solo);
Evasão	Evitando ambientes e condições que favorecem a atividade do patógeno (alqueive, pousio, solarização);
Proteção	Normalmente, o uso de nematicidas para inibir a atividade do patógeno (uso de nematicidas químicos e biológicos);
Resistência	Alterando a constituição genética do hospedeiro para que seja capaz de inibir atividade do nematoide (tipicamente a inibição de reprodução);
Terapia	Ações tomadas após a infecção para limitar o desenvolvimento (tratamentos com água quente de bulbos/estolões/rebentos infectados).

1.5. O cultivo de Feijão-caupi

O feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] é uma planta herbácea e autógama da classe Dicotyledonea, ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolineae, gênero *Vigna*, subgênero *Vigna*, seção *Catyang*, espécie *Vigna unguiculata* e subespécie *unguiculata*, subdividida em quatro cultigrupos *unguiculata*, *sesquipedalis*, *biflora* e *textilis* (VERDCOURT, 1970; MARÉCHAL; MASCHERPA; STAINIER, 1978; SMARTT, 1990; PADULOSI, 1997 citados por FREIRE-FILHO, 2011).

No Brasil o feijão-caupi pode ser conhecido também por nomes populares como: feijão-de-corda, feijão-verde ou feijão-macassar na região Nordeste, feijão-de-praia, feijão-da-colônia e feijão-de-estrada na região Norte; feijão fradinho na região Sudeste e feijão-miúdo, na região Sul (NUNES et al., 2017).

É uma cultura originária da África que chegou ao Brasil pelas mãos dos portugueses, no século XVI (ROCHA et al., 2016). Mesmo sendo uma planta que não possui seu centro de origem no Brasil, ou seja, é uma cultura exótica, existe uma alta variabilidade genética associada a essa cultura (CORREA et al., 2012). Essa variabilidade, pode ser compreendida quando se considera, que as primeiras introduções no Brasil ocorreram há mais de 400 anos, tempo suficiente para a existência de segregações e até mesmo mutações que foram disseminadas em sucessivos plantios, contribuindo para a alta variabilidade atual (FREIRE-FILHO et al., 2011).

Os primeiros cultivos foram iniciados na Bahia, disseminando-se por todo o Nordeste e depois para as demais regiões do País (DE OLIVEIRA et al., 2015). Ao longo do tempo, acabou se tornando uma das espécies graníferas mais amplamente adaptada, versátil e nutritiva, constituindo uma excelente fonte proteica para alimentação humana ou animal, apresentando todos os aminoácidos essenciais, além do mais é fonte de vitaminas, sais minerais e fibras (FROTA; SOARES; ARÊAS, 2008).

É considerado um dos alimentos mais consumidos nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, e além do elevado valor nutricional também é gerador de renda especialmente para o pequeno produtor nordestino (ROCHA, 2009). Porém há avanços significativos do seu cultivo em larga escala, ocupando grandes áreas, principalmente na região Centro-Oeste (MACHADO et al., 2008).

A estimativa é que existem mais de 7.000 cultivares em todo o mundo (CLARK, 2007). No Brasil, por meio do melhoramento genético, já foram lançados 73 cultivares

de feijão-caupi (ROCHA et al., 2016). Todas esses cultivares contribuem, para que esta cultura represente 35,6% da área plantada e 15% da produção de feijão total (feijão-caupi + feijão-comum) no país (CONAB, 2019). A produtividade média dos cultivares de feijão-caupi em condições de sequeiro, lançadas no Brasil, nos últimos 25 anos (1990-2015) apresenta uma variação de 500 a 2.000 quilogramas por hectare. Isso depende do potencial genético e da amplitude das condições ambientais nas quais os cultivares foram avaliados, pois alguns têm recomendação mais restrita a poucos estados e para outras a recomendação é mais ampla, incluindo várias regiões (ROCHA et al., 2016).

É importante mencionar que os cultivares lançados e recomendados pela pesquisa são aceitos pelos produtores em diferentes graus de satisfação (ALVES; MONTAGNER, 2016). Na região Nordeste, houve o destaque do cultivar BRS Guariba, especificamente nos estados do Ceará e da Bahia, o cultivar Patativa e o cultivar Paraguaçu tiveram, respectivamente, boa aceitação pelos agricultores (ALCÂNTARA et al., 2002; FREIRE FILHO et al., 2006). Na região Centro-Oeste, o cultivar BRS Guariba é o mais plantado e o preferido para exportação, seguida do cultivar BRS Nova era, que a cada ano aumenta sua área de plantio (ALVES; MONTAGNER, 2016).

Em avaliações no Cerrado goiano, foram verificadas nas mesmas condições de cultivo, vários genótipos e os mais produtivos foram os BRS Guariba e BRS 17 Gurguéia, com produtividades de 2.211 kg/ha e 2.196 kg/ha de grãos, respectivamente, que obtiveram médias maiores que a da região, em decorrência de menos infecções por oídio, entre outros fatores (TEIXEIRA et al., 2010). Na região Sudeste, há relatos dos cultivares BRS Guariba, BRS Novaera e BRS Xiquexique (MATOSO et al., 2013).

1.5.1. Exigências edafoclimáticas da cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi foi cultivado e domesticado na África durante séculos, após a sua disseminação passou a ser cultivado em todo o mundo, especialmente nos trópicos. É uma cultura de clima tropical quente e que pode ser produzida em regiões semiáridas e savanas secas (SHEAHAN, 2012). É uma planta cultivada em uma ampla faixa de ambientes, desde a latitude 40° N até 30° S, tanto em terras altas como baixas, tais como: Oeste da África, Ásia, América Latina e América do Norte (RACHIE, 1985).

Como apresenta metabolismo C3, seu requerimento de água é variável, de acordo com seus estádios de desenvolvimento, aumentando de um valor mínimo na germinação até um valor máximo na floração e na formação de vagens e decrescendo a partir do início da maturação (GONÇALVES; LIMA, 2021). As faixas de temperatura de 18 a 34 °C são

consideradas ideias para o desenvolvimento da cultura; as temperaturas que podem inibir o crescimento variam com o estágio fenológico, na germinação, de 8 a 11 °C, enquanto para o estágio de floração inicial varia de 8 a 10 °C (CRAUFURD et al., 1996, citado por ANDRADE JÚNIOR et al., 2002).

A exigência hídrica pode variar de 300 mm a 450 mm durante o ciclo, se bem distribuídos nos diferentes estádios de desenvolvimento. Porém esses valores podem mudar de acordo com a cultivar, do solo e das condições climáticas locais, o consumo hídrico diário raramente excede 3,0 mm, quando a planta está na fase inicial de desenvolvimento (ANDRADE JÚNIOR et al., 2002). A evapotranspiração que ocorre em um ciclo nas condições do cerrado piauiense, gira em torno de 383,02 mm, com média diária de 4,12 mm. Sendo que o maior consumo de água ocorre na fase reprodutiva, com valor médio de 3,65 mm.dia⁻¹ (ROCHA et al., 2016).

Em relação ao solo no Brasil, o feijão-caupi pode ser cultivado em quase todos os tipos de solos, merecendo destaque os Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Flúvicos. De um modo geral, desenvolve-se em solos com regular teor de matéria orgânica, soltos, leves e profundos, arejados e dotados de média a alta fertilidade. Entretanto, outros solos como Latossolos e Neossolos Quartzarenicos com baixa fertilidade, podem ser utilizados, mediante aplicações de fertilizantes químicos e/ou orgânicos (BARROS et al.,2021).

1.5.2. O cultivar BRS-Tumucumaque

Muitos são os cultivares de feijão-caupi existentes, e com avanço dessa cultura para maiores áreas centradas na mecanização, há cada vez mais a procura pelos agricultores por cultivares com porte adequado, que sejam resistentes a pragas e doenças, maturidade uniforme e grãos de alta aceitação comercial. Nos últimos anos tem havido estímulos significativos para avanços técnicos científicos dessa cultura, e em decorrência disso surgiu o BRS-Tumucumaque que é um cultivar de feijão-caupi que atende várias exigências dos agricultores, possuindo grande possibilidade de expansão de cultivo (CAVALCANTE; FREIRE-FILHO, 2009). Esse cultivar foi lançado em 2009, e juntamente com outros dois cultivares BRS Aracê e BRS Xiquexique possuem teores de ferro acima de 60 miligramas por quilograma e de zinco acima de 40 miligramas por quilograma, sendo o cultivar BRS Xiquexique o que detém os maiores teores (ROCHA et al., 2016).

O cultivar BRS-Tumucumaque foi selecionado dentre as progênies da linhagem MNC99-537F-4. Os cruzamentos foram realizados na Embrapa Meio-Norte, localizada no estado do Piauí-PI. O cruzamento de origem (TE96-282-22G x IT87D-611-3) data do ano de 2000. Os ensaios de VCU (Valor de Cultivo e Uso), ocorreram de 2004 a 2006 nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Os desempenhos produtivos na região Norte foram: PA (1.126 kg/ha); RR (1.115 kg/ha); RO (1.066 kg/ha); AM (1.399 kg/ha); na região Nordeste foram: PI (636 kg/ha); MA (1.125 kg/ha); RN (1.356 kg/ha); PE (886 kg/ha); AL (814 kg/ha); SE (1.632 kg/ha) e na região Centro-oeste foi de 1.100 kg/há em MS (CAVALCANTE; FREIRE-FILHO, 2009).

As principais características desse cultivar são, hábito de crescimento determinado, porte semiereto, apresenta nível de inserção das vagens no nível da folhagem, o comprimento médio das vagens é de 21 cm, a floração ocorre em média com 37 dias e o seu ciclo pode variar de 65 a 70 dias. O formato da semente é reniforme, com o tegumento de coloração branca, se enquadrando na classe comercial branco e subclasse comercial brancão (CAVALCANTE; FREIRE-FILHO, 2009). A semeadura com 40 cm a 60 cm entre linhas e com 10 a 12 plantas por metro linear é a mais indicada (CAVALCANTE et al., 2014), resultando em 200 a 250 mil plantas por hectare; para essa população de plantas são necessários de 40 a 50 quilos de semente por hectare, e no caso de plantio direto é sugerido acrescentar 20% a mais de sementes (CAVALCANTE; FREIRE-FILHO, 2009).

As características como: precocidade, inserção das vagens acima da folhagem, porte semiereto, alta resistência ao acamamento, boa desfolha natural, conferem a esse cultivar facilidade na colheita manual e viabiliza também a colheita mecanizada, desde que ocorra uma aplicação de herbicidas em pequenas doses, dias antes da colheita (CAVALCANTE; FREIRE-FILHO, 2009). O BRS-Tumucumaque, vem sendo plantado comercialmente desde 2013 no Centro-Oeste, principalmente no Mato Grosso-MT, e vem mantendo regularidade de produção, com uma boa adaptabilidade (OTTONI et al., 2021).

Os seus grãos são brancos, bem formados que é um padrão de preferência de grande faixa de consumidores no mercado nacional (ALVES; MONTAGNER, 2016). Por apresentar essas qualidades nos grãos, vem sendo comercializada tanto para os mercados internos quanto para os externos. A média de produtividade na região do município de Primavera do Leste-MT é de 1.500 kg/ha. Seu cultivo ocorre, geralmente no período 'safrinha' (plantio em janeiro, fevereiro e março), dependendo das condições do mercado, podem ocorrer o plantio em áreas irrigadas entre maio e junho (OTTONI et al., 2021).

1.5.3. Doenças do feijão-caupi

As doenças do feijão-caupi apresentam estreita relação entre a sua manifestação e o ciclo fenológico da cultura, sendo influenciadas pelas condições de clima e de manejo, e estão fortemente vinculadas com a ação antrópica, relacionada ao preparo da área, época de semeadura, correção/adubação do solo, controle de plantas daninhas, espécies cultivadas na safra anterior (ATHAYDE SOBRINHO; VIANA; SANTOS, 2016). Todos esses fatores afetam a dinâmica dos diferentes patossistemas, e a sua severidade se altera conforme a fase fenológica em que a cultura se encontra: germinação, fase de plântula, fase de prefloração e floração, enquanto algumas podem ocorrer na fase pré-colheita e colheita ou até mesmo no período pós-colheita (ATHAYDE SOBRINHO; VIANA; SANTOS, 2005).

Doenças como as viroses, as nematoses e várias doenças fúngicas quando ocorrem são importantes ao longo de todo o ciclo da cultura. De maneira geral, as doenças causam danos que são mais severos se elas ocorrerem entre a emergência e a floração, porque atuam interferindo nos processos fotossintéticos, que desorganizam a síntese e o acúmulo de fotoassimilados refletindo diretamente no rendimento da cultura (COSTA, 2020).

Portanto, as principais doenças fúngicas de ocorrência no Brasil são a morte prematura de plântulas, também denominada ‘damping-off’, que pode ser causada por *Pythium aphanidermatum* (Edson) Fitzp e *R. solani*; ocorrendo na fase de emergência e quando não causam a morte da planta nessa fase, estes fungos, podem interferir na fase de floração e pré-colheita. A podridão cinzenta do caule causada por *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid e *Sclerotium rolfsii* Sacc na fase de pré-floração causa abortamento ou impedimento da floração, podendo causar a morte da planta ou reduzir drasticamente a produção (ATHAYDE SOBRINHO; VIANA; SANTOS, 2000).

A mancha de cercóspora causada por *Cercospora canescens* Ellis & G. Martin e *Pseudocercospora cruenta* (Sacc.) Deighton [*Mycosphaerella cruenta* Latham] torna-se também importante durante a fase de floração. Após essa fase a podridão das vagens ou também chamada de mofo-cinzeno, causada por *Botrytis cinerea*, que geralmente ataca as vagens da planta do início do seu desenvolvimento até a maturação podendo ocorrer maior severidade dessa doença se as condições do ambiente apresentarem temperatura e umidade relativa do ar elevadas. Outras doenças como: o carvão [*Entyloma vignae* Bat., J. L. Bezerra, Da Ponte & I. Vasconc.], a mancha café [*Colletotrichum truncatum* (Schw.) Andrus & Mooree] e oídio [*Erysiphe polygoni* DC. (*Oidium polygoni*)], são consideradas

como doenças de final de ciclo, não causando maiores danos ao desenvolvimento e produção das plantas (COSTA et al., 2020).

Dentre as doenças fúngicas, talvez as mais importantes em algumas condições edafoclimáticas sejam, a murcha causada por *Fusarium oxysporum* Schl. f. sp. *tracheiphilum* E. F. Smith., Synd. & Hans (OMOIGUI et al., 2018). As podridões de fusário causadas por *Fusarium* spp., e as murchas/podridões de esclerócio (*Sclerotium rolfsii*), bem como a mela (*Rhizoctonia solani*) também podem ocorrer e são importantes ao longo de todo o ciclo da cultura (COSTA et al., 2020). Há outras doenças como a ferrugem causada por *Uromyces vignae* Barclay e a sarna das vagens causada pelo fungo *Sphaceloma* sp., que ocorrem em alguns cultivares, porém, sem causar maiores danos (FREIRE-FILHO, 2011).

No Brasil há relatos de somente uma doença de etiologia bacteriana no feijão-caupi, que é a mancha bacteriana [*Xanthomonas axonopodis* pv. *vignicola* (Bondar) (VAUTERIN et al., 1995)], causando sintomas iniciais como pequenos pontos encharcados nas folhas, esses pontos são contornados por áreas de cor amarelo-vivo ou laranja, no centro das quais surgem, posteriormente, pontos necróticos. Essas lesões tendem a coalescer formando manchas extensas. Essa bactéria pode, ocasionalmente, infectar o caule, provocando cancos. Quando há infecção nas vagens há a formação de manchas encharcadas, através das quais a bactéria pode penetrar nas sementes. Essa doença é favorecida e facilmente disseminada durante o período chuvoso, ou em campos irrigados por aspersão (ATHAYDE SOBRINHO; VIANA; SANTOS, 2016).

Existem diversas espécies de vírus que infectam o feijão-caupi, estima-se que exista cerca de 140 espécies virais relatadas nessa cultura em todo mundo (FAJINMI, 2019). No Brasil, as infecções ocasionadas por esses patógenos, podem ocorrer tanto de forma isolada como em coinfeções. As principais doenças de etiologia viral são: o mosaico do pepino [*Cucumber mosaic virus* (CMV) (gênero *Cucumovirus*, família *Bromoviridae*)]; o mosaico-severo-do-caupi [*Cowpea severe mosaic virus* (CPSMV) (gênero *Comovirus*, família *Secoviridae*)]; Bean golden mosaic virus [(BGMV) (gênero *Begomovirus*, família *Geminiviridae*)] (OLIVEIRA et al., 2012).

O *Cowpea aphid-borne mosaic virus* [(CABMV) (gênero *Potyvirus*, família *Potyviridae*)], que é transmitido por pulgões como o *Aphis cracivora* Koch e *Myzus persicae* Sulz., e podem ser transmitidos também via sementes, facilitando dessa forma a sua disseminação (BARROS et al., 2013). Os sintomas das viroses em feijão-caupi se caracterizam geralmente por clorose, amarelecimento internerval, necrose, deformação

foliar, diferentes mosaicos e mosqueados que variam de leves a severos (COSTA et al, 2020). De modo que as plantas podem ser infectadas com um vírus ou infecção mista de diferentes cepas, onde um vírus pode facilitar o aumento na concentração de outro (MUKASA et al., 2006).

Com relação aos nematoides, diferentes espécies do gênero *Meloidogyne* foram relatados em feijão-caupi, sendo que as espécies de maior importância no Brasil são *M. incognita* e *M. javanica* (DA COSTA, 2020). O sintoma típico da infecção por *Meloidogyne* spp. é a formação de galhas nas raízes. As galhas apresentam tamanhos e formas variados e ocorrem tanto na raiz principal como nas demais raízes, podendo deformar todo o sistema radicular. Os sintomas associados à sua infecção geralmente são o nanismo das plantas em reboleiras no campo, com as plantas expressando diversos sintomas: clorose, deficiência mineral e murchas nas horas mais quentes do dia, causando a redução no rendimento de grãos e em muitos casos, resultando na morte precoce da planta (DE SOUSA et al., 2015).

Conhecido como nematoide das lesões radiculares, *Pratylenchus brachyurus* (Godfrey, 1929) Filipjev & Schuurmans Stekhoven, 1941 é comum em plantações de feijão-caupi nos trópicos e sub-trópicos (FERRAZ et al., 2008). No entanto, a patogenicidade de *P. brachyurus* em feijão-caupi tem sido pouco estudada. Os sintomas da infecção por esses nematoides não se manifestam com características bem definidas, podendo seu ataque, ser facilmente creditado a outros fatores. Geralmente, esses sintomas se manifestam em reboleiras no campo, na parte aérea das plantas infectadas semelhantes a deficiências nutricionais (MACHADO et al., 2008).

Esses sintomas, reflexos da infecção, se manifestam com uma significativa redução do crescimento e desenvolvimento das plantas, sobretudo em solos altamente infestados. Uma avaliação minuciosa das raízes das plantas com sintomas, pode revelar a presença de lesões necróticas, superficiais com coloração avermelhada (ATHAYDE SOBRINHO; VIANA; SANTOS, 2016). Em cultivares muito sensíveis, ocorrem extensas áreas necróticas, afetando as raízes e comprometendo o desenvolvimento do sistema radicular, o que impede a absorção de água e nutrientes, podendo levar à morte da planta (LIRA et al., 2018).

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, P.; GOUZY, J.; AURY, J. M.; CASTAGNONE-SERENO, P.; DANCHIN, E. G. J.; DELEURY, E.; PERFUS-BARBECH, L.; ANTHOUARD, V.; ARTIGUENAVE, F.; BLOK, V. C.; CAILLAUD, M. C.; COUTINHO, P. M.; DA SILVA, C.; DE LUCA, F.; DEAU, F.; ESQUIBET, M.; FLUTRE, T.; GOLDSTONE, J. V.; HAMAMOUCHE, N.; HEWEZI, T.; JAILLON, O.; JUBIN, C.; LEONETTI, P.; MAGLIANO, M.; MAIER, T. R.; MARKOV, G. V.; MCVEIGH, P.; PESOLE, G.; POULAIN, J.; ROBINSON-RECHAVI, M.; SALLET, E.; SÉGURENS, B.; STEINBACH, D.; TYTGAT, T.; UGARTE, E.; GHELDER, C. V.; VERONICO, P.; BAUM, T. J.; BLAXTER, M.; BLEVE-ZACHEO, T.; DAVIS, E. L.; EWBANK, J. J.; FAVERY, B.; GRENIER, E.; HENRISSAT, B.; JONES, J. T.; LAUDET, V.; MAULE, A. G.; QUESNEVILLE, H.; ROSSO, M.; SCHIEX, T.; SMANT, G.; WEISSENBAACH, J.; WINCKER, P. Genome sequence of the metazoan plant-parasitic nematode *Meloidogyne incognita*. **Nature Biotechnology**, v. 26, p. 909-915, 2008. <https://doi.org/10.1038/nbt.1482>

ALCÂNTARA, J. dos P.; MONTEIRO, I. D.; VASCONCELOS, O. L.; FREIRE-FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q. BRS Paraguaçu, novo cultivar de caupi de porte “enramador” e tegumento branco para o Estado da Bahia. **Revista Ceres**, v. 49, n. 286, p. 695-703, 2002.

ALVES, L. W. R.; MONTAGNER, A. E. A. D. Avaliação de Cultivar de Feijão-caupi em Diferentes Espaçamento e Sistemas de Plantio no Cerrado Amapaense. **Embrapa-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 95, p. 22, 2016.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; DOS SANTOS, A. A.; ATHAYDE SOBRINHO, C.; BASTOS, E. A.; MELO, F. B.; VIANA, F. M. P. **Cultivo do Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Sistemas de Produção – EMBRAPA Meio-Norte, v. 2, n. 1, p. 108, 2002. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/>

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. VON; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**, v. 1, Belo Horizonte, UFMG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, SANEPAR, p. 319-398, 2010.

ATHAYDE SOBRINHO, C.; VIANA, F. M. P.; SANTOS, A. A. Doenças do feijão caupi. In: CARDOSO, M. J. (org.). **A cultura do feijão-caupi no Meio-Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa Meio Norte, p. 120-145, 2000.

ATHAYDE SOBRINHO, C.; VIANA, F. M. P.; SANTOS, A. A. Doenças fúngicas e bacterianas. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (org.). **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 461-484, 2005.

ATHAYDE SOBRINHO, C.; VIANA, F. M. P.; SANTOS, A. A. Doenças do feijão caupi. In: BASTOS, E. A. (org.). **A cultura do feijão caupi no Brasil**. Teresina, Embrapa Meio Norte, p. 71, 2016.

BARROS, G. B.; NOGUEIRA, M. D. S. D. R.; OLIVEIRA, C. R. R. D.; FREIRE-FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q., VEIGA, C. F. D. M.; BRIOSO, P. S. T.; EIRAS, M. Obtenção de plantas de feijão-caupi resistentes ao *cowpea severe mosaic virus* e ao *cowpea aphid-borne mosaic virus*. **Summa Phytopathologica**, v. 39, n. 2, p. 130–136, abr. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-54052013000200009>

BARROS, J. R. A.; GUIMARÃES, M. J. M.; SILVA, R. M. E. S.; RÉGO, M. T. C.; DE MELO, N. F.; CHAVES, A. R. M.; ANGELOTTI, F. Selection of cowpea cultivars for high temperature tolerance: physiological, biochemical and yield aspects. **Physiol Mol Biol Plants**, v. 27, p. 29–38, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00919-7>

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: Estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1129–1139, 1 nov. 2017.

BONANOMI, G.; IPPOLITO, F.; SCALA, F. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. **Journal Plant Pathology**, v. 97, p.223–34, 2015. <https://doi.org/10.4454/jpp.v97i2.3381>

BONANOMI, G.; LORITO, M.; VINALE, F.; WOO, S. L. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: Toward a Unified Framework for Disease Suppression. **Annual Review Phytopathology**, v. 56, n. 1, p. 1-20, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-100046>

CAESB. **Lodo de Esgoto, Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal**. Disponível em: <www.caesb.df.gov.br/esgoto/sistemas-de-esgotamento.html>. Acesso em: 14 dezembro, 2018.

CARNEIRO, R. M. D. G.; DE FREITAS, V. M.; MATTOS, J. K.; CASTRO, J. M. C.; GOMES, C. B.; CARNEIRO, R. G. Major guava nematodes and control prospects using resistance on *Psidium* spp. and non-host crops. **Acta Horticulturae**, v. 959, p. 41-49, 2012. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.959.4>

CAVALCANTE, DA S.; FREIRE-FILHO, F. R. BRS-Tumucumaque cultivar de feijão-caupi para o Estado do Amapá-AP. **Embrapa- Amapá-Informação Técnica**, v. 1, n. 96, p. 2, 2009.

CLARK, A. (ed.) Cowpeas: *Vigna unguiculata*. In: **Managing cover crops profitably**. 3rd ed. Sustainable Agriculture Research and Education, College Park, MD. P.125–129, 2007. Disponível em: <http://www.sare.org/LearningCenter/Books/Managing-Cover-Crops-Profitably3rd-Edition/Text-Version/Legume-CoverCrops/Cowpeas>. Acesso em julho de 2020.

CLAUDIUS-COLE, A. O.; FAWOLW, B.; COYNE, D. L. Management of *Meloidogyne incognita* in yam-based cropping systems with cover crops. **Crop Protection**, v. 63, p. 97–102, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.05.011>

COLLANGE, B.; NAVARRETE, M.; PEYRE, G. MATEILLE, T.; TCHAMITCHIAN, M. Root-knot nematode (*Meloidogyne*) management in vegetable crop production: The challenge of an agronomic system analysis. **Crop Protection**, v. 30, n. 10, p. 1251–1262,

2011. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.04.016>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos– v.6 – Safra 2018/19 – Nono levantamento, Brasília, p.1-113, janeiro 2021.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n.º 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Seção I, p. 141-146. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=506>>. Acesso em 28 de jul. de 2018.

COSTA, M. L.; KERN, D. C. Geochemical signatures of tropical soils with archaeological black earth in the Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 66(1), p. 369–385, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(99\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(99)00038-2)

CRAUFURD, P.; ELLIS, R.H.; SUMMERFIELD, R.J.; MENIN, L. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*) I. The influence of temperature on seed germination and seedling emergence. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 32, n. 1, p. 1-12, 1996.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, DOS S. F.; FIGUEIREDO, V. S. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 45, p.137-187, 2017. <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11814>

CURTIS, R. H. C.; ROBINSON, A. F. Hatch and host location. In: PERRY, R. N.; STARR, J. L.; MOENS, M. (ed.) **Root-knot nematodes**. CAB International, Wallingford, Oxon CAB. p. 139-162, 2009.

DA COSTA, F. A. Cadernos do Semiáridos riquezas & oportunidades / Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco, v.17, p. 1-64, 2020.

DE ARAÚJO, F. F.; MARCHESI, G. V. P. Use of *Bacillus subtilis* in the control of root-knot nematode and the growth promotion in tomato. **Ciencia Rural**, v. 39, n. 5, p. 1558–1561, 2009.

DE OLIVEIRA, E.; MATTAR, E. P. L.; DE ARAÚJO, M. L.; DE JESUS, J. C. S.; NAGY, A. C. G.; SANTOS, V. B. Descrição de cultivares locais de feijão-caupi coletados na microrregião Cruzeiro do Sul, Acre, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 3, p. 243–254, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201404553>

SOUSA, C. C.; PEDROSA, E. M.; ROLIM, M. M.; DE OLIVEIRA FILHO, R. A.; DE SOUZA, M. A.; PEREIRA FILHO, J. V. Growth and enzymatic responses of cowpea under water stress and root-knot nematode. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 113–118, 2015.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; BALBINOT

JUNIOR, A. A. Práticas culturais na entressafra da soja para o controle de *Pratylenchus brachyurus*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1720–1728, 2016. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016001000003>

DESAEGER, J. A.; WATSON, T. T. Evaluation of new chemical and biological nematicides for managing *Meloidogyne javanica* in tomato production and associated double-crops in Florida. **Pest Management Science**, v. 75, n. 12, p. 3363–3370, 2019. <https://10.1002/ps.5481>

DJIAN-CAPORALINO, C.; MATEILLE, T.; BAILLY-BECHET, M.; MARTEU, N.; FAZARI, A.; PIERRE BAUTHEAC, P.; RAPTOPOULO, A.; DUONG, L. V.; TAVOILLOT, J.; MARTINY, B.; GOILLON, C.; CASTAGNONE-SERENO, P. Evaluating sorghums as green manure against root-knot nematodes. **Crop Protection**, v. 122, p. 142-150, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.002>.

EGAMBERDIEVA, D.; WIRTH, S.; BEHRENDT, U.; ABDALLAH, E.F.; BERG, G. Biochar treatment resulted in a combined effect on soybean growth promotion and a shift in plant growth promoting rhizobacteria. **Frontiers Microbiology**, v.7, p. 209. 2016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00209>

ELAD, Y.; DAVID, D.R.; MELLER HAREL, Y. BORENSHTEIN, M.; BEN KALIFA, H.; SILBER, A.; GRABER, E. R. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. **Phytopathology**, v. 100, p. 913–921, 2010. <https://10.1094/PHYTO-100-9-0913>

ELLING, A. A. Major emerging problems with minor meloidogyne species. **Phytopathology**, v.103, p.1092-102, 2013. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-13-0019-RVW>

ELMER, W. H.; PIGNATELLO, J. J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. **Plant Disease**, v. 95, p. 960-966, 2011. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741>

FAJINMI, A. A. Interactive Effect of *Blackeye cowpea mosaic virus* and *Cucumber mosaic virus* on *Vigna unguiculata*. **Horticultural Plant Journal**, v. 5, n. 2, p. 88–92, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.01.001>

FIGUEIREDO, C. C. D.; COSER, T. R.; MOREIRA, T. N.; LEÃO, T. P.; VALE, A. T. D.; PAZ-FERREIRO, J. Carbon mineralization in a soil amended with sewage sludge-derived biochar. **Applied Science**, v. 9, p. 4481, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9214481>

FIGUEIREDO, C. C.; WICKERT, É. G.; VIEIRA NEVES, H. C.; COSER, T. R.; PAZ-FERREIRO, J. Sewage sludge biochar increases nitrogen fertilizer recovery: evidence from a ¹⁵N tracer field study. **Soil Use Management**, v.37, p. 689–697, 2020. <https://doi.org/10.1111/sum.12672>

FREDDI, L. A. Riscos associados à aplicação do lodo de esgoto na agricultura. **Revista Científica ANAP Brasil**, v.12, p.24, 2019. <https://doi.org/10.17271/19843240122420191982>

FREIRE-FILHO, F. R.; ROCHA, M. M.; BRIOSO, P. S. T.; RIBEIRO, V. Q. 'BRS Guariba': white-grain cowpea cultivar for midnort region of Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 6, n. 2, p. 175-178, 2006.

FREIRE-FILHO, F. R.; RIBEIRO V. Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. S.; RODRIGUES, E. V. Produção, melhoramento genético e potencialidades do feijão-caupi no Brasil. **Embrapa Meio-Norte, Teresina**, 84p, 2011.

FROTA, K. DE M. G.; SOARES, R. A. M; ARÊAS, J. A. G. Composição química do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), cultivar BRS-Milênio. **Food Science and Technology**, v. 28, n. 2, p. 470-476, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000200031>.

GAO, Y.; LU, Y.; LIN, W.; TIAN, J.; CAI, K. Biochar suppresses bacterial wilt of tomato by improving soil chemical properties and shifting soil microbial community. **Microorganisms**, v. 7, n. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120676>

GEORGE, C.; KOHLER, J.; RILLIG, M. C. Biochars reduce infection rates of the root-lesion nematode *Pratylenchus penetrans* and associated biomass loss in carrot. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 95, p. 11-18, 2016. <https://10.1016/j.soilbio.2015.12.003>

GODOY, L. C. A logística na destinação do lodo de esgoto. **Revista Científica On-line Tecnologia, Gestão, Humanismo**, v. 2, n. 1, 2013. Disponível em: <<http://www.fatecguaratingueta.edu.br/revista/index.php/RCO-TGH/article/view/43/27>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

GONÇALVES, Z. S.; LIMA, L. K. S. Desempenho agrônomo e diversidade genética de linhagens de feijão-caupi nas condições do Recôncavo da Bahia. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 9, p. 285-294, 2021. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v9n3.goncalves>

GU, Y.; HOU, Y.; HUANG, D.; HAO, Z.; WANG, X.; WEI, Z.; JOUSSET, A.; TAN, S.; XU, D; QIRONG SHEN, Q.; XU, Y.; FRIMAN, V. Application of biochar reduces *Ralstonia solanacearum* infection via effects on pathogen chemotaxis, swarming motility, and root exudate adsorption. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 269–281, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3159-8>

HADAR, Y.; PAPADOPOULOU, K. K. Suppressive Composts: microbial ecology links between abiotic environments and healthy plants. **Annual Review of Phytopathology**, v. 50, n. 1, p. 133–153, 2012. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-172914>

HAREL, Y. M.; ELAD, Y.; RAV-DAVID, D.; BORENSTEIN, M.; SCHULCHANI, R.; LEW, B.; GRABER, E. R. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar

fungal pathogens. **Plant Soil**, v.357, p. 245-57, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3>

HASHEM, M.; ABO-ELYOUSR, K. A. Management of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on tomato with combinations of different biocontrol organisms. **Crop Protection**, v. 30, n. 3, p. 285–292, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.12.009>

HUANG, B.; LI, J.; WANG, Q.; GUO, M.; YAN, D.; FANG, W.; REN, Z.; WANG, Q.; OUYANG, C.; LI, Y.; CAO, A. Effect of soil fumigants on degradation of abamectin and their combination synergistic effect to root-knot nematode. **PLOS ONE**, v. 13, p. 6, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188245>

HUANG, W.K.; JI, H.; GHEYSEN, G.; DEBODE, J.; KYNDT, T. Biochar-amended potting medium reduces the susceptibility of rice to root knot nematode infections. **BMC Plant Biology**, v. 15, p. 267, 2015. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0654-7>

HUANG, W. K.; SUN, J. H.; CUI, J. K.; WANG, G. F.; KONG, L. A.; PENG, H.; CHEN, S. L.; PENG, D. L. Efficacy evaluation of fungus *Syncephalastrum racemosum* and nematicide Avermectin against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on cucumber. **PloS ONE**, v. 9, n. 2, p. 89717, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089717>

HUSSEY, R. S.; JANSSEN, G. J. W. Root-knot nematodes: *Meloidogyne* species. In: Plant resistance to parasitic nematodes. In: STARR, J.L.; BRIDGE, J.; COOK, R. (eds) **Plant resistance to parasitic nematodes**. CABI Publishing, Wallingford, p. 43–70, 2002. <https://10.1079/9780851994666.0000>

HUYNH, B. L.; MATTHEWS, W. C.; EHLERS, J. D.; LUCAS, M.R., SANTOS, J. R.; NDEVE, A., CLOSE, T. J., ROBERTS, P. A. A major QTL corresponding to the Rk locus for resistance to root-knot nematodes in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **Theoretical and Applied Genetics**, v. 129, n. 1, p. 87–95, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2611-0>

IBEKWE, A. M.; PAPIERNIK, S. K.; GRIEVE, C. M. ; YANG, C. H. Influence of fumigants on soil microbial diversity and survival of *E. coli* O157:H7. **Journal of Environmental Science and Health**, Part B, v. 45, p. 416-426, 2010. <https://doi.org/10.1080/03601231003800073>

IBI - INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil, 2012. Disponível em: <http://www.biocharinternational.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V1.1.pdf> Acesso em 15 dezembro, 2019.

JAISWAL, A. K.; ALKAN, N.; ELAD, Y.; SELA, N.; PHILOSOPH, A. M.; GRABER, E. R.; FRENKEL, O. Molecular insights into biochar-mediated plant growth promotion and systemic resistance in tomato against *Fusarium* crown and root rot disease. **Scientific Reports**, v. 10, p.1–15, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70882-6>

JONES, J. T.; HAEGEMAN, A.; DANCHIN, E. G. J.; GAUR, H. S.; HELDER, J.;

JONES, M. G. K.; KIKUCHI, T.; MANZANILLA-LOPEZ, R.; PALOMARES-RIUS, J. E.; WESEMAEL, W. M. L.; PERRY, R. N. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**. v.14, p. 946-961, 2013. <https://doi.org/10.1111/mpp.12057>

KERN, D. C., LIMA, H. P, COSTA, J. A.; DE LIMA, H. V.; RIBEIRO, A. B.; MORAES, B.M.; KÄMPFET, N. Terras pretas: approaches to formation processes in a new paradigm. **Geoarchaeology**, v. 32, p. 694– 706, 2017. <https://doi.org/10.1002/zea.21647>

KHAN, A.; WILLIAMS, K.L.; NEVALAINEN, H. K. M. Effects of *Paecilomyces lilacinus* protease and chitinase on the eggshell structures and hatching of *Meloidogyne javanica* juveniles. **Biological Control**, v.31, p. 346-352, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.07.011>

KHAN, Z.; KIM, Y. H. A review on the role of predatory soil nematodes in the biological control of plant parasitic nematodes. **Applied Soil Ecology**, v. 35, n. 2, p. 370–379, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.07.007>

LAFORET, M. R. A transferência de tecnologia de processos de produção de fertilizantes organominerais: pesquisa-ação sobre uma parceria público-privada. Dissertação (Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual, Inovação e Desenvolvimento) – **Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI)**, Rio de Janeiro, 2013.

LAIRD, D. A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 1, p. 178–181, 2008. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0161>

LAYEK, J.; NARZARI, R.; HAZARIKA, S.; DAS, A.; RANGAPPA, K.; DEVI, S.; BALUSAMY, A.; SAHA, S.; MANDAL, S.; IDAPUGANTI, R. G. Prospects of Biochar for sustainable agriculture and carbon sequestration: an overview for Eastern Himalayas. **Sustainability**, v. 14, p. 6684, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14116684>

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science and technology**. Routledge, London, UK, 2009.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. London: Routledge, 2015.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biologt Biochemistry** 43:1812–1836, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>

LIRA, V. L.; COSTA, A. F.; MOURA, R. M.; MAIA, L. C. *Rotylenchulus reniformis* (Nematoda: Tylenchida): biologia, identificação, patogenicidade e manejo. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 15, p. 91-102, 2018.

MACHADO, C. F.; TEIXEIRA, N. J. P.; FREIRE-FILHO, F. R.; ROCHA, M. M.; GOMES, R. L. F. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39,

p.114-123, 2008.

MAIA, C. M. B. F.; MADARI, B. E.; NOVOTNY, E. H. Advances in biochar research in Brazil. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, n. 1, p. 53-58, 2011. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/916200>

MALHERBE, S.; MARAIS, D. Nematode community profiling as a soil biology monitoring tool in support of sustainable tomato production: a case study from South Africa. **Applied Soil Ecology**, v. 93, p. 19–27, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.03.011>

MARTINS, S. F.; TSUTSUI ESPERANCINI, M. S. .; GAGLIARDI QUINTANA, N. R.; DE SOUZA BARBOSA, F. Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, v. 36, n. 2, p. 218–229, 2021. <https://10.17224/EnergAgric.2021v36n2p218-229>.

MATOSO, A. O.; SORATTO, R. P.; CECCON, G.; FIGUEIREDO, P. G.; NETO, A. L. Desempenho agrônômico de feijão-caupi e milho semeados em faixas na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 722-730, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000700004>

MATSUBARA, Y.; HASEGAWA, N.; FUKUI, H. Incidence of *Fusarium* root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments. **Journal of the Japanese Society of Horticultural Science**, v. 71, p. 370-374, 2012. <https://10.2503/JJSHS.71.370>

MEHARI, Z. H.; ELAD, Y.; RAV-DAVID, D.; GRABER, E. R.; MELLER HAREL, Y. Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Botrytis cinerea* by biochar amendment involves jasmonic acid signaling. **Plant and Soil**, v. 395, n. 1–2, p. 31–44, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2445-1>

MOENS, M.; PERRY, R. N.; STARR, J. L. *Meloidogyne species*—a diverse group of novel and important plant parasites. In: PERRY, R. N.; MOENS, M.; STARR, J. L. (Ed.). **Root-knot nematodes**. CABI Publishing, London, 1-17p, 2009.

MUKASA, S. B.; RUBAIHAYO, P. R.; VALKONEN J. P. T. Interactions between a *Crinivirus*, an *Ipomovirus* and a *Potyvirus* in co-infected sweet potato plants. **Plant Pathology**, v. 55, p. 458-467, 2006.

NECHET, K. D. L.; HALFELD-VIEIRA, B. A. Reação de cultivares de feijão-caupi à mela (*Rhizoctonia solani*) em Roraima. **Fitopatologia Brasileira**, v. 32, n. 5, p. 424–428, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582007000500009>

NOLING, J. W. **Nematode management in carrots**, University of Florida, IFAS Extension, v. 021, p. 1–13, 2012.

NOVOTNY, E. H.; HAYES, M. H. B.; MADARI, B. E.; BONAGAMBA, T. J.; AZEVEDO, E. R.; DE SOUZA, A. A.; SONG, G.; NOGUEIRA, C. M.; MANGRICH, A.S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of

charcoal for soil amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p.1003-1010, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532009000600002>

NUNES, R. T. C.; SOUZA, U. O.; NETO, A. C. A.; MORAIS, O. M.; FOGAÇA, J. J. N.; SANTOS, J. L.; CARDOSO, A. D.; SÃO JOSÉ, A. R. Produção e qualidade de sementes de feijão-caupi em função de doses de molibdênio e da população de plantas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 533–542, 2017. <https://doi.org/10.19084/RCA17028>

OLIVEIRA, C. R. R.; FREIRE-FILHO, F. R.; NOGUEIRA, M. DO S. DA R.; GISLANNE, B.; EIRAS, M.; RIBEIRO, V. Q.; LOPES, Â. C. DE A. Reação de genótipos de feijão-caupi revela resistência às coinfeções pelo *Cucumber mosaic virus*, *Cowpea aphid-borne mosaic virus* e *Cowpea severe mosaic virus*. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 59-66, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012005000007>

OMOIGUI, L. O.; DANMAIGONA, C. C.; KAMARA, A. Y.; EKEFAN, E. J.; TIMKO, M. P. Genetic analysis of Fusarium wilt resistance in cowpea (*Vigna unguiculata* Walp.). **Plant Breeding**, v. 137, n. 5, p. 773–781, 2018. <https://doi.org/10.1111/pbr.12628>

ONU- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision**, (ST/ESA/SER.A/366). 2015. Disponível em: <https://population.un.org/wup/publications/files/wup2014-report.pdf>. Acesso em jun. 2020.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World population prospects 2019**. Data Booklet. ST/ESA/SER.A/424. Disponível em: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_DataBooklet.pdf. Acesso em ago. 2020.

OTTONI, G.; OLIVEIRA JÚNIOR, M. X.; BEZERRA NETO, F. V.; AMARAL, A. M.; SANTOS, M. Â. C. M. Growth and production of cowpea BRS Tumucumaque cultivated in different population densities. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, p. e175101421851, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21851>

PATEL, S.; DHILLON, N. K. Effect of degradation period of *Crotalaria juncea* (Sunnhemp) on root knot nematode (*Meloidogyne incognita*). **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 5, n. 6, p. 714–715, 2017.

POSTMA, J.; CLEMATIS, F.; NIJHUIS, E. H.; SOMEUS, E. Efficacy of four phosphate-mobilizing bacteria applied with an animal bone charcoal formulation in controlling *Pythium aphanidermatum* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in tomato. **Biological Control**, v. 67, p. 284–291, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.07.002>

POVEDA, J.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, Á.; FENOLL, C.; ESCOBAR, C. The use of biochar for plant-pathogen control. **Phytopathology**, v. 111:9, p. 1490-1499, 2021. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0248-RVW>

RACHIE, K. O. Introduction. In: SINGH, S. R.; RACHE, K. O. (Ed.). **Cowpea research, production, and utilization**. John Wiley & Sons, Chichester, p. 21-28, 1985.

RALMI, N. H. A. A.; KHANDAKER, M. M.; MAT, N. Occurrence and control of root knot nematode in crops: a review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 12, p. 1649–1654, 2016. <https://doi:10.21475/ajcs.2016.10.12.p7444>

ROCHA, M. M. O. Feijão-caupi para consumo na forma de grãos fresco. **Agrosoft Brasil**, 11 nov. 2009. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/574539> Acesso em: 20 de jul. 2020.

ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; MENEZES JÚNIOR, J. A. N.; HASHIMOTO, J. M.; NEVES, A. C., SOUZA; F. M., RIBEIRO, E.; FERNANDES, L. **Feijão-caupi: Melhoramento genético para o avanço da cultura**. Embrapa Meio-Norte, Teresina, p. 6, 2016.

SANTOS, J. R. P.; NDEVE, A. D.; HUYNH, B. L.; MATTHEWS, W. C.; ROBERTS, P. A. QTL mapping and transcriptome analysis of cowpea reveals candidate genes for root-knot nematode resistance. **PLOS ONE**, v. 13, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189185>

SHANG, X.; HUNG, C-Y.; HUSK, B.; ORSAT, V.; WHALEN, J. K. Wood-based biochar for small fruit production in southern Quebec, Canada. **Canadian Journal Soil Science**, v. 1, p. 102, 2022. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0152>

SHEAHAN, C. M. **Plant guide for cowpea (*Vigna unguiculata*)**. USDA-Natural Resources Conservation Service, Cape May Plant Materials Center, Cape May, NJ, 2012.

SIDDIQUE, S.; GRUNDLER, F. M. Parasitic nematodes manipulate plant development to establish feeding sites. **Current Opinion in Microbiology**, v. 46, p. 102-108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2018.09.004>

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. **Advances in Agronomy**, v. 105, p. 47-82, 2010. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)

SUBEDI, P.; GATTONI, K.; LIU, W.; LAWRENCE, K. S; PARK, S. W. Current Utility of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria as Biological Control Agents towards Plant-Parasitic Nematodes. **Plants (Basel)**, v. 9, p. 1167, 2020. <https://doi:10.3390/plants9091167>

TEIXEIRA, I. R.; SILVA, G. C. S.; OLIVEIRA, J. P. R.; SILVA, A. G.; PELÁ, A. Desempenho agrônômico e qualidade de sementes de cultivares de feijão-caupi na região do cerrado. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 2, 2010.

UNEP. **Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer, 6th edition**. Ozone Secretariat, UNEP, Nairobi, p. 44–45, 2000.

VALLAD, G. E. G.; ROBERT, M. Systemic acquired resistance and induced systemic resistance in conventional agriculture. **Crop Science**, v. 44, p. 19-20, 2004. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.1920>

WALKIEWICZ, A.; KALINICHENKO, K.; KUBACZYŃSKI, A.; BRZEZIŃSKA, M.; BIEGANOWSKI, A. Usage of biochar for mitigation of CO₂ emission and enhancement of CH₄ consumption in forest and orchard Haplic Luvisol (Siltic) soils. **Applied Soil Ecology**, v. 156, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103711>

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J., JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v 1, p. 56, 2010. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>

YUAN, H.; LU, T.; WANG, Y.; CHEN, Y.; LEI, T. Sewage sludge biochar: nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. **Geoderma**, v. 267, p. 17–23, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.020>

ZWART, D. C.; KIM, S. H. Biochar amendment increases resistance to stem lesions caused by *Phytophthora* spp. in tree seedlings. **HortScience**, v. 47, p. 1736-1740, 2012. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.12.1736>

CAPÍTULO 2

BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI EM SOLO ÁCIDO DO CERRADO

BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI EM SOLO ÁCIDO DO CERRADO

RESUMO

O aproveitamento do lodo de esgoto (LE) transformado em biocarvão (BC) através da pirólise é uma alternativa que transforma um resíduo gerado permanentemente, e que é um poluente ambiental, em um insumo agrícola de alta qualidade. Nesse contexto, o uso de biocarvão de lodo de esgoto (BCLE) pode representar uma alternativa viável e sustentável para melhorar o solo e o desenvolvimento das plantas. O objetivo desse estudo foi avaliar o BCLE produzido a 300 °C e 500 °C em concentrações variando de 0,0 (controle) a 3,0%, nas alterações físicas e químicas do solo e produtivas nas plantas de feijão-caupi (FC). A aplicação do BC300 e BC500 nas concentrações de 0,5%, 1,0% e 1,5% aumentaram o pH, matéria orgânica, CTC, os teores dos macronutrientes (P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (Zn, Mn, Cu, B, F, Co), a condutividade elétrica e modificou a temperatura do solo, proporcionando melhor desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, elevando a produção do FC. Nas concentrações acima de 2,0% houve uma redução da eficácia do BCLE sobre as plantas. Demonstrando a viabilidade desse material, como uma fonte alternativa de nutrientes para a produção de FC em Latossolo Vermelho típico do Cerrado.

Palavra-chave: Agricultura sustentável, *Vigna unguiculata*, Latossolo Vermelho

SEWAGE SLUDGE BIOCHAR IN THE DEVELOPMENT OF COWPEA PLANTS IN THE CERRADO ACIDIC SOIL

ABSTRACT

The use of waste biomass to produce biochar (BC) and application in the soil is a technology being tested in the world agricultural scenario, mainly regarding the use of sewage sludge (SS), a product generated in large quantities every day in the cities around the planet. The use through pyrolysis is an alternative that transforms a permanently generated residue, which is an environmental pollutant, into a high-quality agricultural input. Therefore, the agricultural use of this material is promising, and, in this context, the use of sewage sludge biochar (SSBC) may represent a viable and sustainable alternative to improve soil and plant development. The aim of this study was to evaluate the SSBC at 300° and 500°C in concentrations varying from 0.0 (control) to 3.0%, in the physical and chemical alterations of the soil and productivity in cowpea (CP) plants. The application of BC300 and BC500 increased the pH, organic matter, CEC, the levels of macronutrients (P, K, Ca, Mg, S) and micronutrients (Zn, Mn, Cu, B, F, Co), the electrical conductivity of the soil and changed the temperature, providing better development of the root system and shoots and increasing plant production. In concentrations up to 1.5% of both BC's there was greater development and production of pods, demonstrating the feasibility of this material as an alternative source of nutrients to produce CP in a typical Cerrado Oxisol.

Keywords: Sustainable Agriculture, *Vigna unguiculata*, oxisol

1. INTRODUÇÃO

A pirólise da biomassa de resíduos é uma forma de decomposição térmica do tipo exotérmica, que com a queima desse material, na ausência de oxigênio são gerados produtos sólidos (biocarvão-BC), líquidos (bio-óleo) e gasosos (biogás) (LEHMANN, 2007). O produto sólido BC, quando aplicado ao solo, contribui para armazenamento de carbono no solo, reduzindo as emissões na atmosfera, contribuindo para a redução do aquecimento global (LAIRD, 2008).

Dessa forma esta tecnologia tem atraído a atenção, principalmente pelos motivos citados anteriormente. Em primeiro lugar, os BC's podem ser usados como corretivos de acidez e melhorador do solo, com reflexos no aumento da produtividade das culturas. Além disso, o armazenamento de BC nos solos é considerado um meio de sequestro permanente de carbono (GLASER; LEHR, 2019).

Quando aplicado ao solo como insumo, junto com fertilizantes orgânicos e inorgânicos, o BC pode melhorar significativamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a produtividade das culturas agrícolas (ENDERS et al., 2012). Os mecanismos específicos subjacentes à sua contribuição em relação à resposta da planta ainda não foram totalmente compreendidos, porém as condições regionais, incluindo o clima, a química do solo, podem influenciar nos benefícios agrônômicos do BC. Além disso, a partir de biomassas de diferentes matérias-primas e condições de pirólise geram-se BC's com diferentes propriedades físicas e químicas (KEILUWEIT et al., 2010).

O BC pode melhorar a produtividade das plantas, diretamente como resultado da interação no sistema solo/planta/microbioma, por meio de um conjunto de fatores: (I) liberação de nutrientes (DING et al., 2016); (II) aumento no pH do solo (RONDON et al., 2007); (III) maior capacidade de troca catiônica do solo (TRAZZI et al., 2018); (IV) melhoria nas propriedades físicas do solo (BROCKHOFF et al., 2010), (V) aumento na retenção de água no solo (ENDERS et al., 2012); e (VI) alteração das populações e funções microbianas do solo (STEINBEISS; GLEIXNER; ANTONIETTI, 2009).

Em geral o BC pode ter esses efeitos isoladamente, ou também pode haver um sinergismo entre os diferentes modos de ação, que em conjunto resultam em um melhor desempenho da cultura (DING et al., 2016). A aplicação de BCLE como um corretivo do solo tem o potencial de fornecer uma opção viável para o fornecimento de nutrientes quando aplicado nos solos, melhorando a prática de reaproveitamento dos nutrientes

desde resíduo urbano, além de contribuir para a estocagem de carbono no solo (HOSSAIN et al., 2010).

Em solos do cerrado, o uso do BC de madeira de eucalipto afetou positivamente a fertilidade do solo aumentando o carbono orgânico total, Ca, P, e pH e reduzindo os níveis de Al e H+Al a 0–10 cm de profundidade, com efeito significativo sobre a produtividade do arroz de terras altas, quando associado com a adubação mineral (PETTER; MADARI, 2012). Em um estudo do com a aplicação do BCLE nas condições edafoclimáticas do cerrado com cultivo de milho, as temperaturas em que são realizadas a pirólise se mostraram importantes, ou seja, a variação térmica no preparo do LE podem influenciar nos efeitos do BC no solo, a pirólise a 300 °C desse material se destacou, aumentando a biomassa microbiana, além de favorecer a síntese e excreção da glomalina no solo (DE FIGUEIREDO et al., 2019).

Nos estudos com o biocarvão citados anteriormente, foram apresentados exemplos do uso de dois tipos de biomassa utilizadas para o preparo do BC e aplicados em condições de campo, em áreas de solos do Cerrado, com cultivo de gramíneas. Contudo, o BCLE tem se mostrado efetivo também no cultivo de leguminosas, aumentando o efeito sinérgico com *Trichoderma harzianum* Rifai, que atuou na indução de crescimento das plantas e promoveu redução nos danos de *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid na cultura do feijão-comum em casa de vegetação (ARAUJO; BLUM; FIGUEIREDO, 2019). Dessa forma, os benefícios da aplicação desse material nas propriedades físicas, químicas, biológicas do solo e os indícios de possíveis efeitos na redução de danos de patógenos habitantes do solo, levaram a elaboração deste trabalho, para explorar inicialmente os impactos da aplicação do BCLE, em Latossolo Vermelho (LV), cultivado com feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.].

O BRS Tumucumaque foi o cultivar escolhido para o desenvolvimento dos ensaios, pois apresenta alta produtividade de grãos com qualidade comercial (ROCHA et al., 2016). Dessa forma, é um cultivar com arquitetura de planta, precocidade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, características importantes para o cultivo em diferentes escalas produtivas, porém sua escolha, como planta modelo para os ensaios, se baseou principalmente pelo fato de ser altamente suscetível ao nematoide-das-galhas. Fato recentemente comprovado no trabalho de seleção de acessos de feijão-caupi resistentes a *Meloidogyne* spp. (DIAS, 2020).

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do BCLE em LV preservando as condições naturais de fertilidade, com vistas a identificar alguns efeitos isolados deste

bioinsumo no solo e a sua influência no desenvolvimento de plantas de feijão-caupi em casa de vegetação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais

Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação na Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília/EEB-UnB, localizada em Brasília-DF. Os ensaios foram desenvolvidos no período de dezembro de 2019 a fevereiro de 2020 para o primeiro ensaio (EXP.1) e de fevereiro 2020 a abril 2020 para o segundo ensaio (EXP.2). A temperatura na casa de vegetação durante o experimento variou de 19 °C a 33 °C, com temperatura média nesse período de 26 °C. Essa temperatura é considerada ideal para o desenvolvimento das plantas de feijão-caupi no Brasil (ROCHA et al., 2016). O período total de avaliação experimental na casa de vegetação, foi 90 dias após a semeadura (DAS) para cada ensaio.

2.2. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos

O Solo utilizado foi retirado de uma área com LV sob vegetação nativa do Cerrado *strictu sensu* ou cerradão localizado na Fazenda Água Limpa-FAL-UnB localizada no Núcleo Rural Vargem Bonita em Brasília-DF. O solo foi coletado a um metro de profundidade. O solo foi transportado até a EEB-UnB, onde foi esterilizado via calor úmido em autoclave (1 atm; 121°C; 120 minutos), após essa etapa foi deixado em ambiente protegido, dentro da casa de vegetação durante 48 horas em temperatura ambiente para a secagem.

2.3. Local de coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão

O LE utilizado foi proveniente da estação de tratamento de esgoto (ETE) da – CAESB – ETE - Melchior, localizada na região administrativa de Samambaia-DF e transportado em tambores de polietileno de alta densidade com capacidade de 60 litros, até o local de produção do biocarvão situado na Fazenda Água Limpa-FAL da Universidade de Brasília-UnB, no Laboratório de Qualidade e Preservação da Madeira.

O LE retirado da estação de tratamento foi seco ao ar (aproximadamente 20% de umidade) e posteriormente triturado em fragmentos de diferentes granulometrias e submetido a pirólise nas temperaturas de 300 °C e 500 °C em um forno adaptado para realização do procedimento (Linn Elektro Therm, Eschenfelden, Alemanha) (Figura 1).



Figura 1. Preparo do biocarvão de lodo de esgoto. (A) trituração do lodo de esgoto, após a secagem, (B) lodo de esgoto triturado, (C) forno mufla adaptado para realização da pirólise, (D) recipiente metálico adaptado e vedado para o processo da pirólise, (E) biocarvão 300 °C, (F) biocarvão 500 °C.

Dentro do forno, as amostras foram colocadas em um recipiente de metal adaptado ao espaço interno, que contém um sistema de saída de gases e bio-óleo, com mecanismo para evitar o fluxo de oxigênio e um termostato digital para o controle da temperatura. A taxa média de aumento de temperatura do forno foi de $2,5 \text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, totalizando 120 e 200 minutos até atingir 300 °C e 500 °C respectivamente. O tempo de residência foi de 5 horas. Após a pirólise, o BCLE foi pesado e acondicionado em recipientes plásticos (polietileno de alta densidade), com capacidade de 50 litros que possuem fechamento interno com tampa plástica e fechamento externo com aro metálico galvanizado, onde foi armazenado até a montagem dos ensaios em casa de vegetação.

2.4. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo

Após a esterilização e secagem o solo foi depositado em vasos com capacidade de 1,5 litros, neles foram adicionadas as diferentes concentrações em proporção de BCLE por massa do solo seco: 0,0% (controle), 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0% para cada temperatura de preparo 300 °C e 500 °C, totalizando 14 tratamentos.

Para a aplicação no solo, o BCLE foi peneirado em peneira de 50 mesh, com abertura de 0,297 mm, e pesado em balança de precisão (Gehaka®, modelo BG-100 AS-BI). De acordo com a concentração de BCLE determinada para cada tratamento, foram aplicadas em percentagem de acordo com o peso do solo seco. Após a adição o BCLE foi

incorporado ao solo por meio do revolvimento com uma pá metálica jardineira, de forma que ficasse distribuído uniformemente dentro do vaso.

Cada concentração, considerando a densidade do solo igual a um, e uma camada arável de 0 a 20 cm, em que na área de um hectare, se tenha uma massa de 2.000.000 kg de solo nessa camada, a concentração de 0,5% de BCLE corresponderia a proporção de uma aplicação de 10 ton/ha. Dessa forma, as quantidades de BCLE que seriam aplicadas em toneladas por hectare em cada concentração utilizada nos ensaios são: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 ton/ha para as concentrações de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0%, respectivamente.

2.5. Caracterização física do solo utilizado nos ensaios

As características granulométricas do LV utilizado, foram mensuradas via peneiramento e seguindo os critérios do sistema brasileiro de classificação de solo. Sua textura foi caracterizada como ‘muito argilosa’, por possuir conteúdo de argila superior a 600 g kg⁻¹.

Tabela 1. Análise granulométrica em quantidades e percentuais de areia, silte e argila do Latossolo Vermelho utilizado nos ensaios.

Propriedades	Valores
Areia grossa (g kg ⁻¹)	35,00 ± 3,00
Areia Fina (g kg ⁻¹)	50,50 ± 4,50
Silte (g kg ⁻¹)	141,33 ± 13,50
Argila (g kg ⁻¹)	773,17 ± 19,37
Areia Total (%)	8,53 ± 0,67
Silte Total (%)	14,15 ± 1,35
Argila Total (%)	77,32 ± 1,94
Textura ^a	Muito argilosa

^a Segundo o sistema brasileiro de classificação de solo (SANTOS, 2018).

2.6. Caracterização química do solo do lodo de esgoto e biocarvão de lodo de esgoto

As propriedades físicas e químicas do LE e BCLE são mostradas na Tabela 2. Carbono (C) e nitrogênio (N) foram determinados usando um analisador elementar (PE 2400, série II CHNS/O, PerkinElmer, Norwalk, EUA). O pH foi determinado em uma solução de CaCl₂ 0,01 M, usando uma suspensão de 1:5 (p/v) de proporção biocarvão:solução (BRASIL, 2017). As substâncias húmicas foram determinadas por fracionamento via solubilidade em meio alcalino e ácido (SWIFT, R.S., 1996). E foram

extraídas com uma solução de NaOH 0,1 M e o teor de C foi determinado de acordo com Yeomans e Bremner (1988).

Os teores de macronutrientes [fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S)] foram determinados após digestão nitroperclórica (DA SILVA, 2009). O P foi quantificado pelo método do molibdovanadato, K por fotometria de chama e os demais Ca, Mg e S foram determinados por plasma indutivamente acoplado por espectrometria de emissão (ICP-OES) (ICPE-9000, Shimadzu, Japão). Informações complementares sobre as metodologias utilizadas para a caracterização físico-química de LE e os BC's está disponível em Figueiredo et al. 2018, 2019 e Araujo et al. (2021).

Tabela 2. Propriedades físico-químicas do Latossolo Vermelho, lodo de esgoto e dos biocarvões de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C).

Propriedades ^a	Latossolo Vermelho	Lodo de Esgoto	BCLE300	BCLE500
Umidade (%)	nd	10,62 ± 1,56	4,26 ± 0,23	3,17 ± 0,05
Sólidos Voláteis (%)	nd	48,25 ± 1,36	41,75 ± 2,47	29,74 ± 1,40
Cinzas (%)	nd	39,33 ± 2,38	48,27 ± 1,08	60,05 ± 0,51
Carbono Fixo (%)	nd	1,79 ± 0,52	5,72 ± 1,55	7,04 ± 0,86
Carbono Inerte (%)	nd	3,23 ± 0,39	2,86 ± 0,34	3,18 ± 0,08
Carbono Total (%)	nd	18,58 ± 0,26	19,92 ± 0,28	18,65 ± 0,18
COT ^b (%)	nd	17,45 ± 0,85	18,61 ± 0,09	16,90 ± 0,85
MOT ^c (%)	15,19 ± 0,69	30,09 ± 1,47	32,09 ± 0,15	29,13 ± 1,47
Ácido Fúlvico (g kg ⁻¹)	nd	24,10 ± 0,58	23,89 ± 0,33	15,12 ± 0,50
Ácido Húmico (g kg ⁻¹)	nd	8,45 ± 0,39	7,51 ± 0,11	2,92 ± 0,05
Huminas (g kg ⁻¹)	nd	146,28 ± 3,00	139,90 ± 1,21	143,49 ± 2,85
Nitrogênio (%)	nd	3,99 ± 0,05	5,05 ± 1,16	5,03 ± 0,88
C/N	nd	4,66 ± 0,02	3,95 ± 0,96	3,71 ± 0,77
pH (CaCl ₂)	4,49 ± 0,03	5,48 ± 0,02	6,04 ± 0,04	6,50 ± 0,01
CTC ^d (mmol L ⁻¹)	25,61 ± 2,77	286,67 ± 1,53	265,00 ± 2,00	224,67 ± 1,53
Fósforo (g kg ⁻¹)	9,96 ± 2,28	22,81 ± 1,84	30,94 ± 1,97	33,74 ± 2,12
Potássio (g kg ⁻¹)	0,34 ± 0,04	nd	nd	nd
Cálcio (g kg ⁻¹)	4,04 ± 0,28	13,17 ± 0,21	11,33 ± 0,15	19,47 ± 0,47
Magnésio (g kg ⁻¹)	2,15 ± 0,12	2,53 ± 0,06	2,77 ± 0,06	3,13 ± 0,06
Enxofre (g kg ⁻¹)	14,34 ± 1,71	13,70 ± 0	15,10 ± 0	23,13 ± 0,46
Boro (mg kg ⁻¹)	0,13 ± 0,04	nd	nd	nd
Cobre (mg kg ⁻¹)	0,08 ± 0,02	100,00 ± 0	113,33 ± 5,77	130,00 ± 10,00
Ferro (g kg ⁻¹)	7,21 ± 0,38	15,40 ± 0,17	16,40 ± 0,10	16,93 ± 0,06
Manganês (mg kg ⁻¹)	0,29 ± 0,03	100 ± 0	100 ± 0	103,33 ± 5,77
Zinco (mg kg ⁻¹)	0,11 ± 0,01	400,00 ± 0	503,33 ± 5,77	433,33 ± 57,74
Rendimento (%)	nd	nd	82,48 ± 1,10	64,32 ± 0,60

^a Valores médios ± desvio padrão (n = 3); ^bCarbono orgânico total (Walkley-Black); ^cmatéria orgânica total; ^dcapacidade de troca catiônica; nd: não determinado. Modificado de Araujo et al. (2021).

O LV utilizado, preservava as condições químicas naturais do local de coleta sob vegetação nativa, sem a adição de corretivos (calcário, gesso), adubos orgânicos (esterços), químicos (NPK), ou qualquer aditivo externo às condições naturais, que pudessem promover alterações no solo. Os Latossolos de maneira geral, são solos profundos, com pouca diferenciação dos horizontes, bastante intemperizados, apresentam argilas de baixíssima atividade, com pouca retenção de bases e ausência de minerais primários como a sílica e outros elementos, que são lixiviados, promovendo o enriquecimento relativo em óxidos de Fe e Al (EMBRAPA, 2013).

2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento

As sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Tumucumaque, adquiridas da Embrapa-Semi-árido, foram armazenadas em câmara fria a uma temperatura constante de 15 °C. Antes da semeadura, as sementes foram desinfestadas usando uma solução de hipoclorito de sódio (NaOCl), na concentração de 0,5% durante 10 min. Logo após a desinfestação, três sementes foram inseridas no solo úmido em cada vaso a uma profundidade de 1,0 cm e cobertas com uma camada fina de solo. Sete dias após a semeadura foi realizada a retirada das plântulas de menor vigor, permanecendo uma plântula de maior vigor por vaso.

2.8. Medidas da condutividade elétrica e temperatura do solo

As medidas de condutividade elétrica (CE) e temperatura no solo foram realizadas utilizando um condutímetro compacto (Hanna®, modelo– “GroLine Soil Test”). As medidas foram realizadas de acordo com as recomendações do fabricante, através da penetração da sonda de aço inoxidável diretamente no solo, para serem tomadas as medidas de CE e temperatura. Todas as medidas foram tomadas entre 10 e 16 horas, sendo a temperatura do solo e CE medidas em uma única operação para cada vaso. As faixas de CE medidas pelo dispositivo variam de 0,00 a 4,00 mS/cm (dS/m), com resolução 0,01 mS/cm e precisão da CE $\pm 0,05$ mS/cm (de 0,00 a 2,00 mS/cm) $\pm 0,30$ mS/cm (de 2,00 a 4,00 mS/cm). A faixa de temperatura medida pelo equipamento é de 0,0 a 50,0 °C com resolução da temperatura 0,1 °C de precisão ± 1 °C, sendo a compensação de temperatura realizada automaticamente, com coeficiente de temperatura (β) fixada 2%/ 0 °C.

2.9. Avaliação dos parâmetros indicadores do desenvolvimento das plantas

Foram avaliadas as seguintes variáveis: crescimento vegetativo referente à altura da parte aérea medido com uma fita métrica ao final do ciclo da cultura. Foi medido também, o diâmetro do caule na altura da cicatriz de abscisão do primeiro par de folhas, que corresponde a uma altura de 1 a 1,5 cm em relação ao solo, sendo medido com um paquímetro digital (IGaging®). A massa fresca da parte aérea (MFPA) e a massa fresca de raiz (MFR) foram medidas em uma balança eletrônica de precisão (Gehaka®, modelo BG-100 AS-BI). A massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca da raiz (MSR) foram medidas em balança de precisão, após a secagem do material vegetal em estufa na temperatura de 60° até que o peso do material estivesse constante, em torno de 28 horas após o início da secagem do material.

2.10. Análises da fertilidade química do solo

As amostras de solo, foram coletadas após a retirada do sistema radicular das plantas de feijão-caupi para a avaliação final dos rendimentos das massas. Retirando-se uma amostra de 150 gramas de solo de cada vaso, correspondente a toda a região da zona de crescimento radicular das plantas. Cada amostra simples, foi misturada com outras amostras em um béquer de 2 litros, seis no total, formando as amostras compostas, com três repetições para cada tratamento. As amostras compostas do primeiro ensaio foram secas ao ar livre, até o término do segundo ensaio, onde repetiu-se o procedimento.

Posteriormente, houve a mistura do solo dos ensaios, correspondentes às mesmas concentrações, que formaram três amostras compostas de 300g, para cada tratamento. Após a coleta, mistura e identificação as amostras foram armazenadas em embalagens, plásticas e enviadas ao laboratório. A análise de todos os parâmetros relacionados à fertilidade química do solo, os teores de macro e micronutrientes seguiram a recomendação de Camargo (2009).

2.11. Delineamento e análises estatísticas

Foram realizados dois ensaios (EXP.1 e EXP.2) avaliados em esquema fatorial (2 x 7), ou seja, 14 tratamentos avaliados, sendo duas temperaturas de preparo do BCLE e sete concentrações aplicadas para cada temperatura de preparo, onde foram avaliadas seis plantas para cada concentração, sendo uma planta por repetição, em um total de 6 repetições, distribuídas em delineamento inteiramente casualizado. Foram avaliadas 42 plantas para cada temperatura de pirólise, somando-se as duas temperaturas totalizaram-se 84 plantas avaliadas para cada ensaio e 168 plantas nas duas avaliações.

Os dados obtidos foram tabulados no EXCEL® e submetidos à análise de variância (teste F). Para todos os parâmetros avaliados no solo e nas plantas, foi realizada a análise de regressão ($P \leq 0,05$). Os cálculos referentes às análises estatísticas foram executados, utilizando o software SISVAR, desenvolvido na Universidade Federal de Lavras- UFLA (FERREIRA, 2019). As taxas de aumentos ou reduções nos parâmetros avaliados apresentados em porcentagens, foram calculadas de acordo com a seguinte equação: (%) = [(valor médio da testemunha – valor médio da concentração)/ valor médio da testemunha] \times 100.

3. RESULTADOS

3.1. Mudanças nas propriedades químicas do solo

A aplicação de diferentes doses dos BCLE foi responsável pelo aumento de pH do solo em relação ao controle, sendo essa resposta observada até mesmo em menores doses. As maiores doses adotadas nesse estudo proporcionaram um aumento de até uma unidade no pH do solo (Figura 2A).

Os BC's neste estudo resultaram em um incremento de matéria orgânica no solo, com aumentos variando de 16 a 190% para o BC300 e de 4,0 a 161,85% para BC500, sendo esses valores referentes a variação crescente das doses avaliadas (Figura 2B). De forma semelhante, doses crescentes de ambos BC's proporcionaram um aumento significativo da capacidade de troca de cátions-CTC (mmolc/dm^3) do solo. Houve um aumento superior a 120% nos valores de CTC em relação à testemunha quando adotada a dose de 3,0% do BC500 (Figura 2C).

A aplicação dos BC's de LE, produzidos em temperaturas de pirólise de 300°C e 500°C, proporcionaram um incremento de diferentes nutrientes no solo. Doses variando de 0,5 a 3,0% aumentaram os teores de macronutrientes, como: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Visto que, doses crescentes desses materiais quando aplicadas no solo resultaram em aumentos significativos dos teores desses nutrientes (Figura 2).

A aplicação da menor dose de BC300 foi responsável por um aumento de mais de 4.000% do teor de P (mg/dm^3) no solo quando comparado com o controle (0,0% ou sem BC). Esse aumento foi ainda mais expressivo quando utilizado o BC500, visto que a dose

de 0,5% resultou em um aumento superior a 7.800% do teor de P em relação ao controle (Figura 2D).

O aumento de Ca no solo foi evidenciado em doses superiores a 1,0% do BC300 e 0,5% do BC500. Resultado expressivo quando utilizada a dose de 3,0% do BC 500, sendo verificado um incremento de 370% do teor desse nutriente no solo (Figura 2F).

O aporte de enxofre no solo, evidenciado em ambos BC's, pode ser observado até mesmo em menores doses. O teor de S (mg/dm^3) no solo aumentou aproximadamente 564% após aplicação da dose de 0,5% do BC300. Os resultados para essa mesma dose foram ainda mais expressivos quando utilizado o BC500, evidenciando um aumento de 770% do teor de S no solo (Figura 2H).

Foi possível observar que ambos BC's aumentaram significativamente os teores de micronutrientes, tais como: zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu) boro (B), ferro (Fe) e cobalto (Co) (Figura 3). O BC300 se sobressaiu ao BC500 no incremento de zinco no solo. Desde as menores doses de BC300 foi possível observar um aumento significativo dos teores desse micronutriente no solo em relação ao controle. Para se alcançar resultados similares a esse através do uso do BC500 em comparação com o controle, foi preciso adotar doses superiores ou iguais a 1,5% (Figura 3A).

Resultados semelhantes foram observados em relação ao cobre, demonstrando a maior capacidade de fornecimento desses dois micronutrientes pelo BC300 em comparação ao BC500 (Figura 3C). Esses resultados ratificam a capacidade do BCLE na melhoria das propriedades físico-químicas do solo, colaborando com aumento de diferentes nutrientes e, conseqüentemente, se mostrando como um material multifuncional quando aplicado no solo.

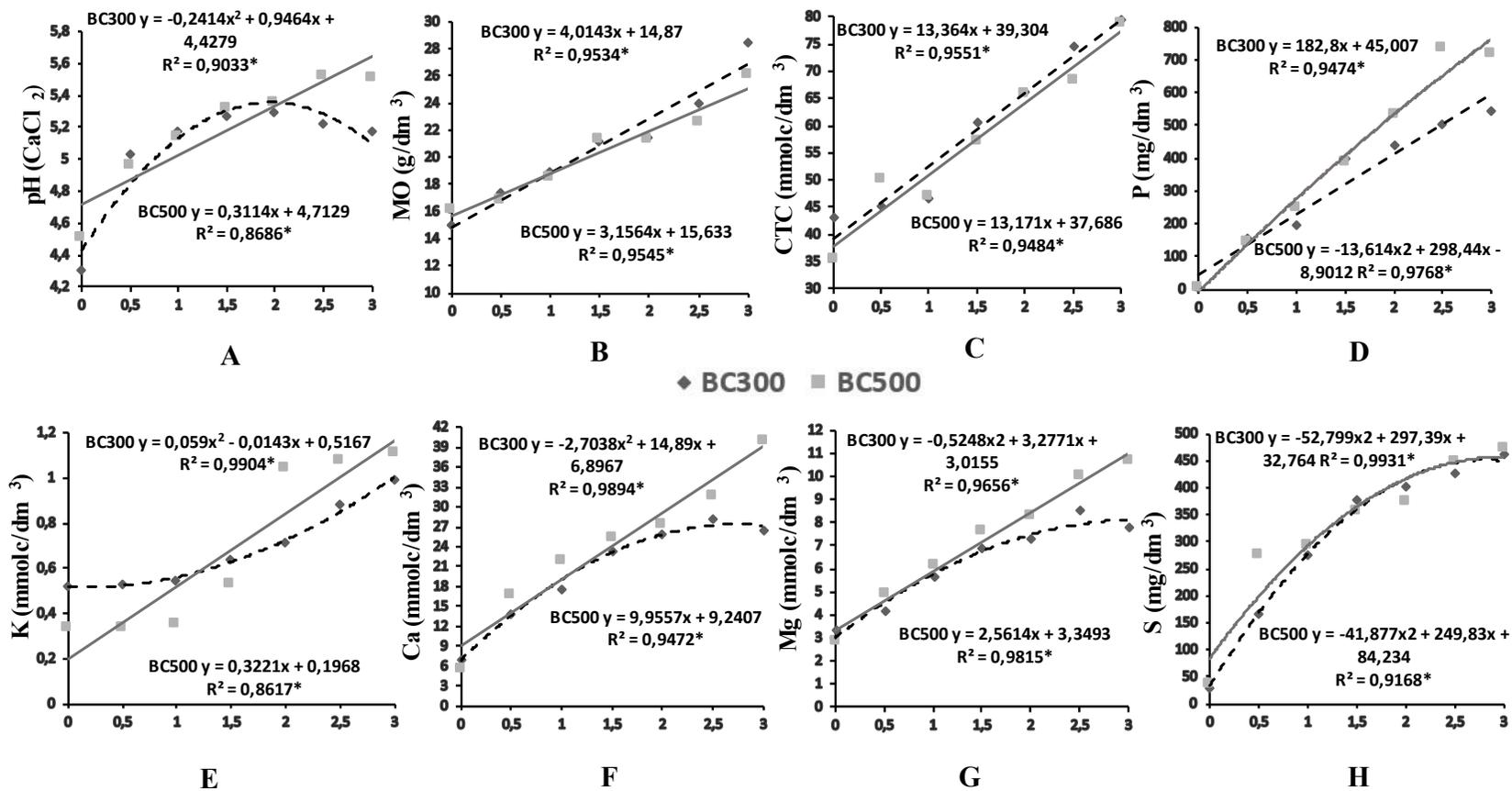


Figura 2. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas propriedades químicas e macronutrientes no solo. **A:** potencial hidrogeniônico, **B:** matéria orgânica, **C:** capacidade de troca catiônica, **D:** fósforo, **E:** potássio, **F:** cálcio, **G:** magnésio, **H:** enxofre. Equação da regressão com valor de R² seguido por (*) foi significativo pelo teste ($p \leq 0,05$).

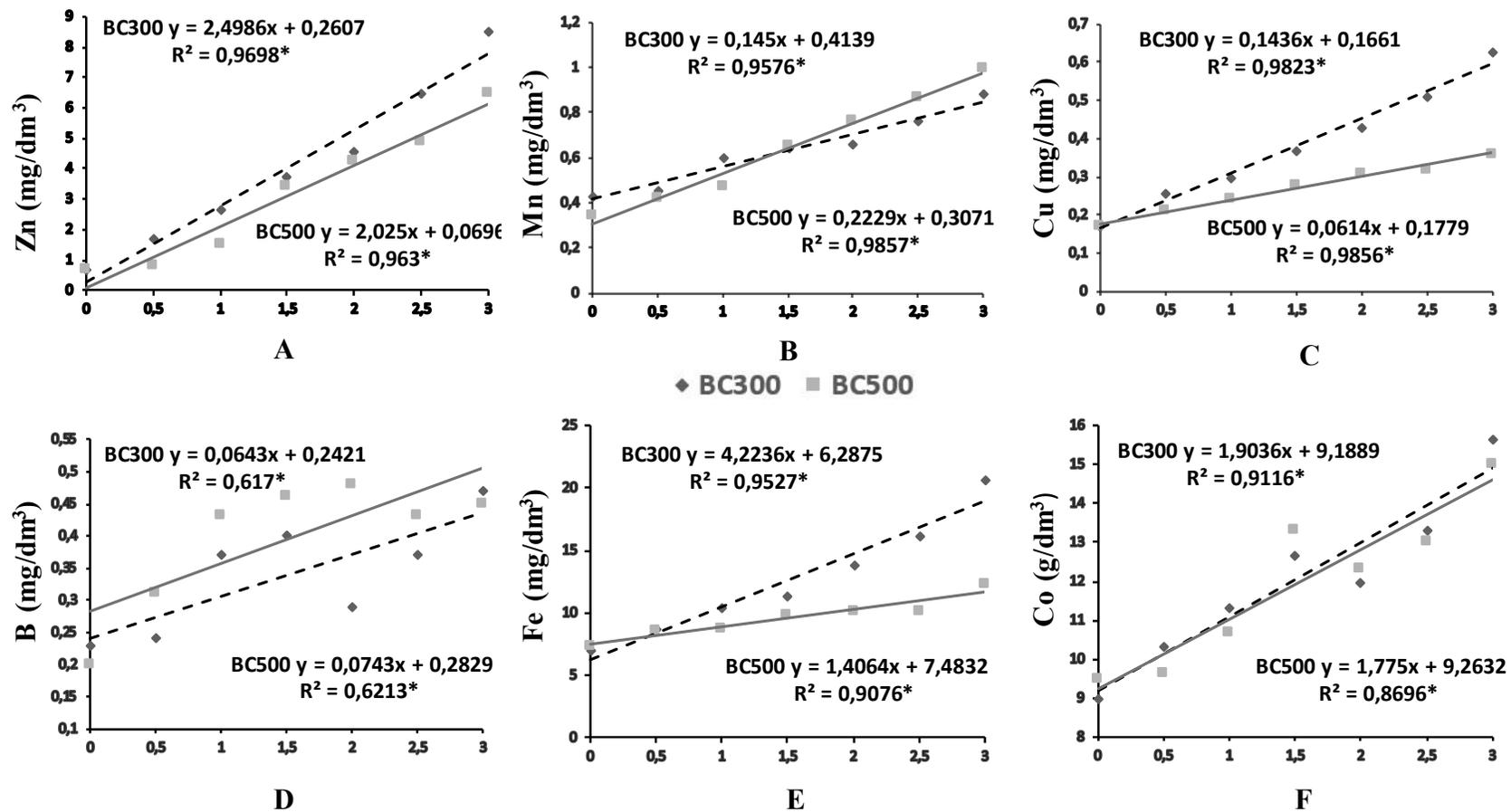


Figura 3. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos micronutrientes no solo. **A:** zinco, **B:** manganês, **C:** cobre, **D:** boro, **E:** Ferro, **F:** Cobalto. Equação da regressão com valor de R^2 seguido por (*) foi significativa pelo teste ($p \leq 0,05$).

3.2. Parâmetros físicos do solo: temperatura e condutividade elétrica

Os parâmetros físicos avaliados apresentaram diferenças significativas, em relação às temperaturas de preparo e entre as diferentes concentrações aplicadas de BCLE aos 90 DAS (Figura 4). No primeiro ensaio (EXP.1) houve um aumento da temperatura do solo em torno de 0,5 °C, em todas as concentrações do BC300 com valor médio de 29 °C. Para o BC500 no primeiro ensaio, as temperaturas médias foram levemente menores em relação ao BC300 com temperatura média de 28,5°C (Figura 4A).

No segundo ensaio (EXP.2) as curvas para a temperatura do solo foram semelhantes para ambos BC's, porém com maiores valores para o BC300. Houve uma queda gradativa da temperatura do solo, conforme aumentou a concentração de BCLE com temperatura média de 28,15 °C (Figura 4A).

Em relação a condutividade elétrica-CE, houve respostas semelhantes entre os dois ensaios realizados (Figura 4B). No primeiro ensaio (EXP.1), os valores da CE do BC300 foi o maior valor mensurado, com exceção do controle que manteve os valores de CE sem alteração. Portanto, houve um aumento gradativo da CE conforme aumentou-se a concentração de BCLE no solo, onde o BC300 3,0% se destacou com o maior valor. O BC500 apresentou menores valores de CE em relação ao BC300. Porém a CE também aumentou gradativamente conforme houve o aumento da concentração do BCLE no solo.

No segundo ensaio a resposta da CE em relação à aplicação do BCLE foi semelhante ao primeiro ensaio, com aumento gradativo desse parâmetro conforme ocorreu o aumento da concentração, independente da temperatura de pirólise (Figura 4B).

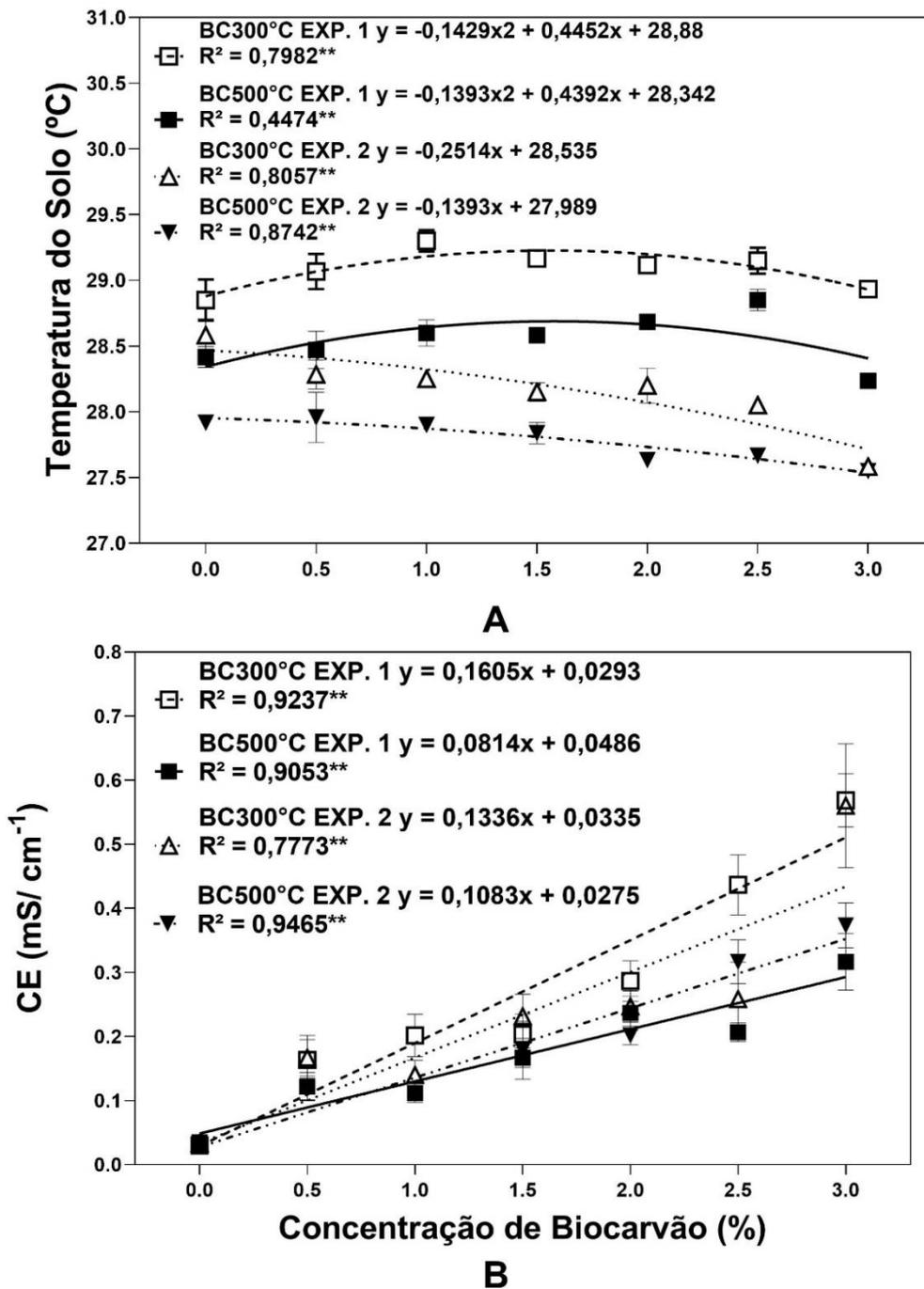


Figura 4. Temperatura do solo (A) e condutividade elétrica-CE (B) em vasos com Latossolo Vermelho cultivado com plantas de feijão-caupi em casa de vegetação, com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C). Coeficiente da equação de regressão R^2 seguido por * foi significante a ($p \leq 0,05$) e ** a ($p \leq 0,01$). As barras indicam o erro padrão das médias.

3.3. Crescimento vegetativo: altura e diâmetro das plantas de feijão-caupi

As medidas da altura das plantas, apresentaram diferenças entre as concentrações, e temperaturas de pirólise do BCLE avaliadas em ambos os ensaios (Figura 5A).

O maior crescimento médio foi com a aplicação de BC300 1,5%. Sendo que o menor crescimento em altura ocorreu no controle. Em relação ao BC500, as plantas apresentaram um crescimento em altura superior ao controle, em que o BC500 1,5% se destacou com maior crescimento em altura (Figura 5A).

No segundo ensaio (EXP.2) as curvas de crescimento no BC300, foram similares ao primeiro ensaio, com crescimento gradativo até a concentração de 1,5%. As concentrações de BC500 no segundo ensaio, proporcionaram um maior crescimento em altura com relação ao controle, em todas as concentrações aplicadas. O maior crescimento ocorreu com BC500 1,5%. Em ambos os ensaios o BC500 proporcionou maior crescimento em altura das plantas ao longo do período avaliado (Figura 5A).

Em relação a expansão lateral do caule, medido através do diâmetro, houve diferenças entre as concentrações de BCLE aplicadas. Para o BC300 no primeiro ensaio a concentração de 1,5% se destacou com o maior diâmetro do caule com valor médio de 3,690 mm. O menor valor medido foi no controle com valor médio de 2,866 mm. No BC500 em relação ao diâmetro do caule no primeiro ensaio, os resultados foram semelhante ao do BC300, porém com uma pequena redução dos valores.

No segundo ensaio as curvas de expansão do diâmetro do caule foram mais regulares, com aumentos gradativos nas diferentes temperaturas de pirólise. O BC300 aumentou de maneira gradativa as medidas, até a concentração de 1,5%. Em relação ao BC500, no segundo ensaio a aplicação do BCLE induziu maior diâmetro do caule, mantendo a curva de expansão do caule similar. Não houveram diferenças significativas entre as temperaturas de pirólise nos ensaios para o diâmetro do caule, com valores semelhantes entre as temperaturas avaliadas (Figura 5B).

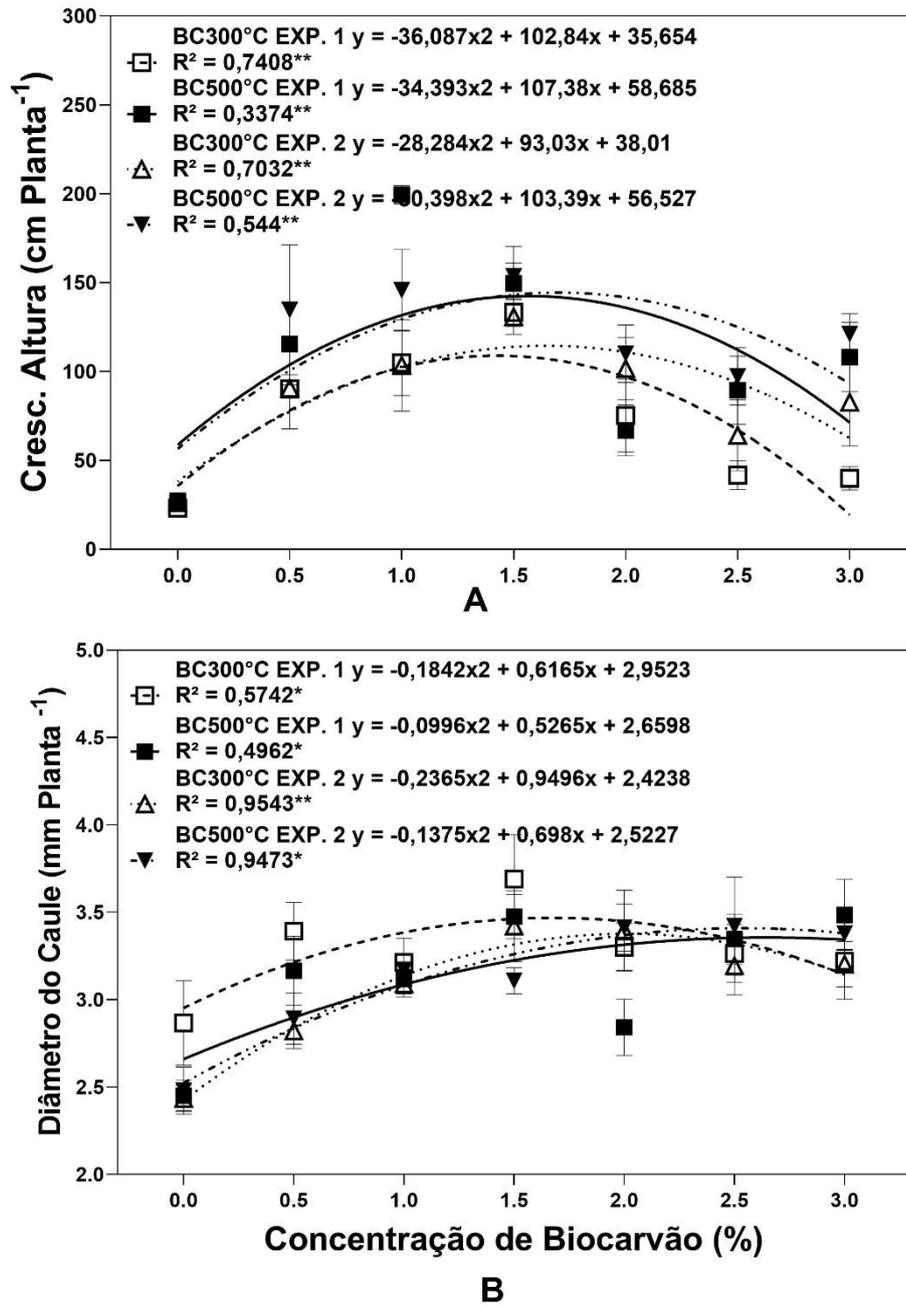


Figura 5. Crescimento em altura (**A**) e diâmetro do caule (**B**) de plantas de feijão-caupi cultivadas em vasos com Latossolo Vermelho em casa de vegetação, com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C). Coeficiente da equação de regressão R^2 seguido por * foi significativa a ($p \leq 0,05$) e ** a ($p \leq 0,01$). As barras indicam o erro padrão das médias.

3.4. Avaliação das massas frescas e secas da raízes da parte aérea e da produção de vagens em plantas de feijão-caupi

No primeiro ensaio (EXP.1), de maneira semelhante para o BC300 e BC500, os tratamentos com que receberam a aplicação de BCLE apresentaram diferenças significativas. Com destaque para concentrações de até 1,5%, que apresentaram maiores valores médios para MFR (Figura 6A). Em relação a massa seca de raiz (MSR) o BC500 1,0% teve o maior valor com 0,141 g (Figura 6B).

No segundo ensaio (EXP.2), os valores médios foram um pouco menores para a maioria dos tratamentos, com variações entre as concentrações que se destacaram no ensaio anterior. O BC300 1,5% apresentou a maior MFR conforme a primeiro ensaio, porém com valor médio menor de 0,391 g e o menor valor no controle com 0,160 g. As plantas que receberam a aplicação do BC500 no segundo ensaio, com exceção da concentração de 2,0%, apresentaram maiores valores que o controle (Figura 6A).

O BCLE também influenciou a massa fresca parte aérea das plantas-MSPA (Figura 6C). No primeiro ensaio (EXP.1) o BC300 1,5% teve o maior valor médio para MFPA com 7,585 g. O BC500 1,0% se destacou com maior valor médio de MFPA com 9,848 g. A aplicação do BC500 apresentou maiores valores médios que o controle em todas as concentrações (Figura 6C).

No segundo ensaio (EXP.2), aplicação do BC300 teve o maior valor médio para a MFPA com o BC300 1,0%, que foi a dosagem que se destacou no primeiro ensaio. Para ao parâmetro MSPA a resposta do BC300 foi semelhante, onde a concentração de 1,5% apresentou o maior valor médio de 0,960 g (Figura 6D).

Nos tratamentos do BC500 no segundo ensaio, houve uma redução no valor da MFPA na concentração de 1,0% com valor médio de 6,20 g. O menor valor encontrado para MFPA foi no controle, que apresentou valor médio 1,900 g. Em relação a MSPA os três tratamentos que se destacaram para MFPA, também apresentaram os maiores valores, com destaque para o BC500 1,5% que apresentou valor médio de 1,762 g, sendo o menor valor médio de 0,281 g para a MSPA do controle (Figura 6D).

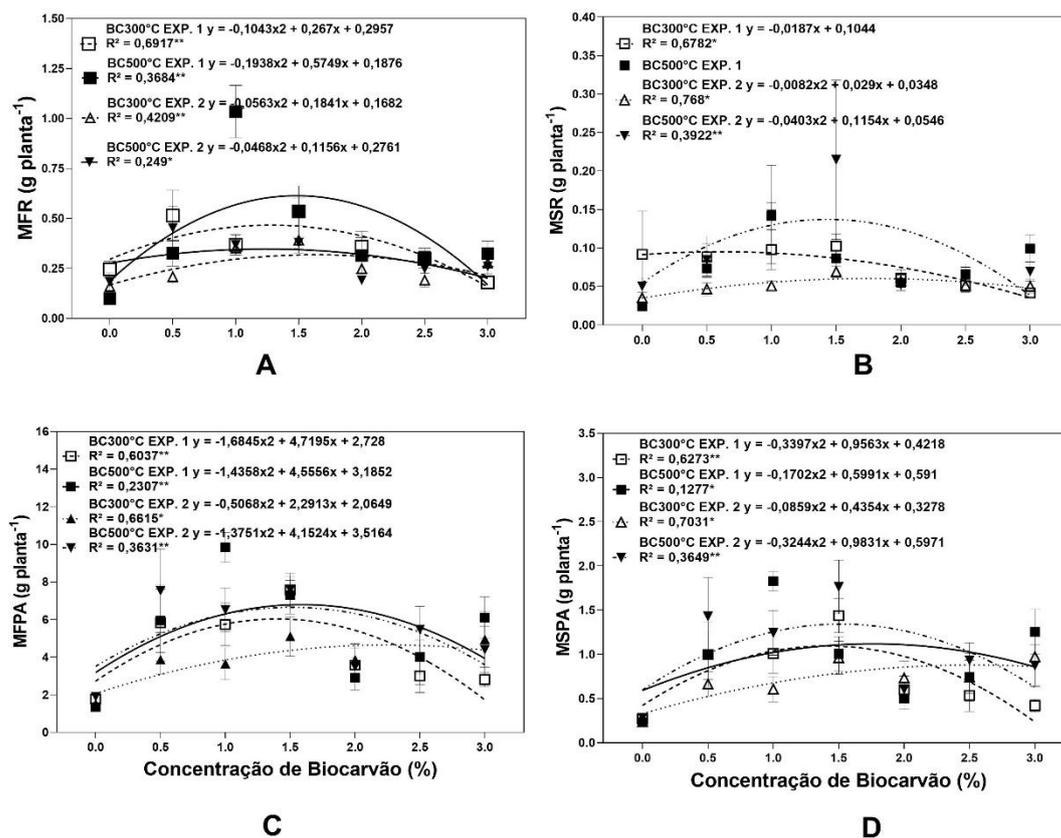


Figura 6. Massa fresca-MFR (A) e massa seca da raiz-MSR (B) Massa fresca da parte aérea-MFPA (C) e massa seca da parte aérea-MSPA (D) de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C). Coeficiente da equação de regressão R^2 seguido por * foi significativa a ($p \leq 0,05$) e ** a ($p \leq 0,01$). Dados com ausência de linhas e equações não apresentaram diferença estatística significativa para a equação de regressão. As barras indicam o erro padrão das médias.

Após os 60 DAS, as plantas de feijão-caupi iniciaram a produção de vagens, que foram mensuradas e são apresentadas na (Figura 7). No (EXP.1) as plantas que receberam a aplicação dos BC's em concentrações de até 2,0%, produziram maior número de vagens se diferenciando do controle em que não houve produção. No segundo ensaio (EXP.2), semelhantemente ao primeiro, o BC300 teve os maiores valores médios para o peso das vagens nas concentrações de 1,5% a 3,0% com valor médio de 0,638 e 0,830 g. Em relação ao BC500 de 0,5% a 1,5% houve maior produção com peso médio das vagens 2,271 g para a menor concentração aplicada (Figura 7).

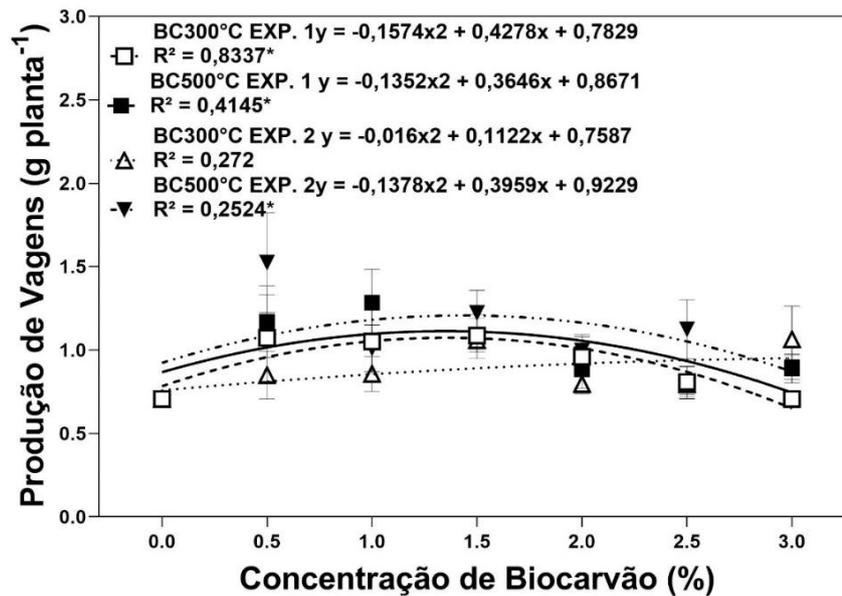


Figura 7. Produção de vagens de plantas de feijão-caupi, cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C). Coeficiente da equação de regressão R^2 seguido por * foi significativa a ($p \leq 0,05$) e ** a ($p \leq 0,01$). As barras indicam o erro padrão das médias. Os dados foram transformados em $\sqrt{x+0,5}$.

Contudo, na (Figura 8) são apresentadas amostras representativas das plantas de feijão-caupi ao final do período de avaliação do (Exp. 1), demonstrando de maneira qualitativa os diferentes graus de crescimentos da parte aérea e do sistema radicular nas concentrações e temperaturas do BCLE avaliadas.



Figura 8. Parte aérea e sistema radicular de plantas de feijão-caupi com 90 dias após à sementeira, cultivadas em vasos com (Latossolo Vermelho) preservando as condições naturais de fertilidade, com a aplicação de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C). (A) Controle-BC300-0,0%, (B) BC300-0,5%, (C) BC300-1,0%, (D) BC300-1,5%, (E) BC300-2,0%, (F) BC300-2,5%, (G) BC300-3,0%, (H) Controle-BC500-0,0%, (I) BC500-0,5%, (J) BC500-1,0%, (L) BC500-1,5%, (M) BC500-2,0%, (N) BC500-2,5%, (O) BC500-3,0%.

4. DISCUSSÃO

O BCLE foi capaz de aumentar os teores de macro e micronutrientes, a temperatura e condutividade elétrica do solo, promovendo maior desenvolvimento radicular e da parte aérea das plantas de FC. Esses resultados são condizentes com os encontrados por diversos autores que avaliaram o rendimento das plantas após a aplicação de BC's (JOSEPH et al., 2021). Acredita-se que após a aplicação no solo, a água entra nos poros do biocarvão dissolvendo compostos orgânicos e minerais solúveis (JOSEPH et al., 2015). Esses solutos aumentam o carbono orgânico dissolvido (CO), os cátions e ânions na solução do solo (SILBER; LEVKOVITCH; GRABER, 2010).

Essas respostas nas alterações da fertilidade do solo foram evidentes com a aplicação do BCLE, que aumentou as concentrações de macronutrientes P, K, Ca, Mg, S, e micronutrientes Zn, Mn, Cu, B, F, Co. Uma meta-análise feita com diversos estudos ao longo da última década, revelou que a aplicação de BC's comumente aumentam a disponibilidade de P, quando aplicado em solos ácidos ou neutros, principalmente aqueles produzidos a partir de matérias-primas de baixo C:N (por exemplo, esterco e resíduos de culturas agrícolas) (GAO; DELUCA; CLEVELAND, 2019). Logo, essa efetividade pode ser maior em BC's produzidos a baixas temperaturas (BUSS et al., 2018; GLASER; LEHR, 2019; BUSS et al., 2020).

No entanto, mesmo havendo aumentos de alguns nutrientes no solo, eles podem não estar totalmente disponíveis para a assimilação pela planta de FC. Principalmente pela disponibilidade de P ser baixa em matérias-primas ricas em Ca e pobres em K como lodo de esgoto (WANG et al., 2019; TORRES-ROJAS et al., 2020). Isso ocorre porque a pirólise pode converter o P orgânico disponível para as plantas em P inorgânico que está menos disponível em curto prazo (ROSE et al., 2019; BUSS et al., 2020).

Pode se afirmar que as mudanças na composição da solução do solo dependem da matéria prima do BC e é específico para cada tipo de solo (MUKHERJEE; ZIMMERMAN, 2013; SCHREITER et al., 2020). E que após a aplicação há uma rápida dissolução desses nutrientes disponíveis no BC, que pode ser rápida e contínua em solos ácidos e com baixo teor de nutrientes (WANG et al., 2020). Portanto, a liberação de nutrientes pelo BC pode ser rápida durante a primeira semana e muito mais lenta nas semanas seguintes (MUKHERJEE; ZIMMERMAN, 2013). Essa velocidade na dissolução inicial, pode ocorrer principalmente através da dissolução de sais e da troca iônica com componentes do solo (WANG et al., 2020). Dessa forma, o BCLE, nas

diferentes concentrações, proporcionou incremento da MFR e MFPA das plantas de feijão-caupi. Proporcionando um melhor desenvolvimento vegetal em altura e diâmetro do caule ao final do ciclo, e esse resultado pode ser reflexo, da melhoria da composição química que alterou a fertilidade do solo.

Aliado a esses ganhos em fertilidade, outros fatores envolvidos na aplicação, podem ter influenciado melhores condições para o desenvolvimento das plantas, entre elas a temperatura do solo, uma propriedade física importante que afeta os ciclos bioquímicos do carbono (C), do nitrogênio (N) e outros elementos que podem determinar o nível de qualidade do solo, podendo afetar o crescimento das plantas, a germinação das sementes e o rendimento das culturas (ZHANG et al., 2019). As diferenças em relação à temperatura do solo nos vasos que receberam a aplicação do BCLE, podem ser atribuídas à densidade aparente relativamente mais baixa, além de um maior teor de água no solo induzido pela aplicação do BC (LIU et al., 2018).

As variações de temperatura encontradas nos ensaios com BCLE, corroboram com os resultados da influência de outros BC's nesse parâmetro, pois podem causar a diminuição da oscilação da temperatura de solos cultivados (BAECHLE; DAVIS; PITTELKOW, 2018). Em condições naturais, solos sob a vegetação típica de savanas, e ecossistemas similares ao Cerrado brasileiro, quanto maior o teor de umidade, menor a temperatura do solo (LIU et al., 2018).

Levando em consideração a CE do solo, que aumentou gradativamente, em relação ao aumento do BCLE, independente da temperatura de pirólise mostra que os resultados obtidos neste estudo assemelham aos da aplicação de BC's produzidos através da gaseificação de resíduos de gramíneas, que apresentaram maiores valores de CE no solo, que é usada como um indicador do conteúdo de íons disponíveis (BREWER et al., 2012). O aumento da CE do solo, em função da aplicação de BC's vem sendo relatado, em diferentes condições edafoclimáticas dos ambientes agrícolas (KUPPUSAMY et al., 2016).

Todos esses aspectos físicos e químicos alterados no solo com a aplicação do BCLE avaliados neste estudo, promoveram ganhos significativos nas MFR e MFPA, mesmo a partir da menor concentração aplicada 0,5% se mantendo até 1,5%, que se manteve os resultados mais expressivos entre vários parâmetros avaliados em ambas as temperaturas nos dois ensaios. Em condições semelhantes às deste estudo, houve maior produção de arroz com a aplicação de BC de restos culturais, em solos ácidos cultivados

em casa de vegetação na China, em que os autores atribuem esses resultados em função da redução da acidez e melhoria da fertilidade do solo (HE et al., 2020).

Portanto, os maiores rendimentos em função do uso do BCLE, podem estar associados à maior disponibilidade de macronutrientes e micronutrientes presentes no biocarvão, bem como ao aumento do pH, aumento da CE, estabilidade da temperatura, principalmente nas concentrações até 2,0%. Do ponto de vista prático, baseado em critérios econômicos, grandes quantidades de BCLE, representariam um aumento dessa matéria prima por hectare, que em níveis elevados, levaria a um aumento expressivo dos custos operacionais, inviabilizando o uso dessa tecnologia futuramente. Portanto, identificar quais concentrações melhoram o desenvolvimento das plantas é fundamental.

Contudo, mesmo que as concentrações de destaque do BC300 e BC500 em relação ao desenvolvimento da planta, nas condições experimentais, não apresentaram altos níveis produtivos, a aplicação do BCLE nessas concentrações permitiram que as plantas chegassem à produção e finalizassem o ciclo produtivo. Portanto, as melhores doses/respostas para o desenvolvimento das plantas de feijão-caupi, trouxeram algumas respostas que auxiliaram nas etapas posteriores desse estudo. De forma, que mais pesquisas são necessárias para a implementação dessa tecnologia nesta e em outras culturas.

5. CONCLUSÕES

O BCLE aumentou o pH, matéria orgânica, CTC, macro e micronutrientes, alterou a temperatura e aumentou a condutividade elétrica do solo. Com a aplicação do BC300 e BC500 houve um melhor desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea e aumento na produção das plantas. As concentrações de 0,5%, 1,0% e 1,5% foram mais eficientes no desenvolvimento das plantas. Apesar dos efeitos benéficos, o estudo mostrou que em concentrações acima de 2,0% houve uma redução da eficácia do BCLE sobre as plantas de feijão-caupi em ambas as temperaturas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAECHLE, B.; DAVIS, A. S.; PITTELKOW, C. M. Potential nitrogen losses in relation to spatially distinct soil management history and biochar addition. **Journal of environmental quality**, v. 47, n. 1, p. 62-69, 2018. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.06.0246>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA. 240 p. 2017.

BREWER, C. E.; HU, Y. Y.; SCHMIDT-ROHR, K.; LOYNACHAN, T. E.; LAIRD, D. A.; BROWN, R. C. Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. **Journal of environmental quality**, v. 41, p. 1115-1122, 2012.

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, p. 1627-1631, 2010. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0188>

BUSS, W.; BOGUSH, A.; IGNATYEV, K.; MASEK, O. Unlocking the fertilizer potential of waste-derived biochar. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 32, p. 12295–12303, 2020. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c0433>

BUSS, W.; ASSAVAVITTAYANON, K.; SHEPHERD, J. G.; HEAL, K. V.; SOHI, S. Biochar phosphorus release is limited by high pH and excess calcium. **Journal of Environmental Quality**, v. 47, n. 5, p. 1298–1303, 2018. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.05.0181>

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico, (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada), p. 77, 2009.

SILVA, F. C. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**, 2nd ed. Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, Brasil. 627 p, 2009.

FIGUEIREDO, C. C.; CHAGAS, J. K. M.; DA SILVA, J.; PAZ-FERREIRO, J. Short-term effects of a sewage sludge biochar amendment on total and available heavy metal content of a tropical soil. **Geoderma**, v. 344, p. 31–9, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.0-1.052>

DIAS, M. A. **Seleção de acessos de feijão-caupi resistentes ao nematoide das galhas (*Meloidogyne* spp.)**. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Programa de Pós-graduação em Fitopatologia, Universidade de Brasília. Brasília, p.59. 2020.

DING, F.; VAN ZWIETEN, L.; ZHANG, W.; WENG, Z. H.; SHI, S.; WANG, J.; MENG, J. A meta-analysis and critical evaluation of influencing factors on soil carbon

priming following biochar amendment. **Journal of Soils and Sediments**, v.18, n. 4, p.1507–1517, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1899-6>

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa CNPS. p. 353, 2013.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; STEPHEN JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance, **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644-653, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** [online], v. 35, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FIGUEIREDO, C.; LOPES, H.; COSER, T.; VALE, A.; BUSATO, J.; AGUIAR, N. Influence of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of biochar from sewage sludge. **Archives of Agronomy Soil Science**, v. 64, n. 6, p. 881-9, 2018. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1407870>

FIGUEIREDO, C. C. D.; COSER, T. R.; MOREIRA, T. N.; LEÃO, T. P.; VALE, A. T. D.; PAZ-FERREIRO, J. Carbon mineralization in a soil amended with sewage sludge-derived biochar. **Applied Sciences**, v. 9, p. 4481, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9214481>

GAO, S.; DELUCA, T. H.; CLEVELAND, C. C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 463–472, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>

GLASER, B.; LEHR, V. I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific Reports**, v. 9, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>

HE, Y.; YAO, Y.; JI, Y.; DENG, J.; ZHOU, G.; LIU, R.; SHAO, J.; ZHOU, L.; LI, N.; ZHOU, X. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C3 but not C4 plants: a global synthesis. **GCB Bioenergy**, v. 12, n. 8, p. 605–617, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12720>

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; CHAN, K. Y.; ZIOLKOWSKI, A.; NELSON, P. F. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 1, p. 223–228, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>

JOSEPH, S.; HUSSON, O.; GRABER, E. R.; VAN ZWIETEN, L.; TAHERYMOOSAVI, S.; THOMAS, T.; NIELSEN, S.; YE, J.; PAN, G.; CHIA, C. The electrochemical properties of biochars and how they affect soil redox properties and processes. **Agronomy**, v.5, n. 3, p. 322–340, 2015. <https://doi.org/10.3390/agronomy5030322>

KEILUWEIT, M.; NICO, P.S.; JOHNSON, M.G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology**, v. 44, p.1247-53, 2010. <https://doi.org/10.1021/es9031419>

KUPPUSAMY, S; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions. **Environment International**, v. 87, p. 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.018>

LAIRD, D. A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. **Agronomy Journal**, v. 100, p. 178-181, 2008. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0161>

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, v. 447, p. 143–144, 2007. <https://doi.org/10.1038/447143a>

LIU, H.; XU, F.; XIE, Y.; WANG, C.; ZHANG, A.; LI, L.; XU, H. Effect of modified coconut shell biochar on availability of heavy metals and biochemical characteristics of soil in multiple heavy metals contaminated soil. **Science of the Total Environment**, v. 645, p. 702–709, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.115>

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A.R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. **Geoderma**, v.193, p. 122-130, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.002>

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p. 761-768, 2012.

ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; MENEZES JÚNIOR, J. A. N.; HASHIMOTO, J. M.; NEVES, A. C.; SOUZA; F. M., RIBEIRO, E.; FERNANDES, L. **Feijão-caupi: melhoramento genético para o avanço da cultura**. Embrapa Meio-Norte, Teresina, p. 6, 2016.

RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biol Fertil Soils**, v. 43, p. 699–708, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0152-z>

ROSE, T. J.; SCHEFE, C.; WENG, Z. H.; ROSE, M. T.; VAN ZWIETEN, L.; LIU, L.; ROSE, A. L. Phosphorus speciation and bioavailability in diverse biochars. **Plant and Soil**, v. 443, n. 1-2, p. 233–244, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04219-2>

SCHREITER, I. J.; SCHMIDT, W.; KUMAR, A.; GRABER, E. R.; SCHÜTH, C. Effect of water leaching on biochar properties and its impact on organic contaminant sorption. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 691–703, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06904-2>

SILBER, A.; LEVKOVITCH, I.; GRABER, E. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: Agronomic implications. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 24, p. 9318–9323, 2010. <https://doi.org/10.1021/es101283d>

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 1301-1310, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.016>.

SWIFT, R.S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H. (Eds.), **Methods of soil analysis part 3 - chemical methods**. Soil Science Society of America. American Society of Agronomy, Madison, WI. p. 1011–69, 1996.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIEKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 875-887, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832128>

WANG, L.; O'CONNOR, D.; RINKLEBE, J.; OK, Y. S.; TSANG, D. C. W.; SHEN, Z.; HOU, D. Biochar aging: Mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 23, p. 14797–14814, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04033>

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p. 1467–1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

ZHANG, H.; SHI, X.; YU, D.; WANG, H.; ZHAO, Y.; SUN, W.; HUANG, B. Seasonal and regional variations of soil temperature in China. **Acta Pedol Sinica**, v. 46, p. 227–234, 2019.

CAPÍTULO 3

**BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO CONTROLE DE
Meloidogyne incognita EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI**

BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO CONTROLE DE *Meloidogyne incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI

RESUMO

Em regiões tropicais nematoides do gênero *Meloidogyne* têm causado danos significativos em plantas hospedeiras, incluindo o feijão-caupi. Os principais métodos de controle utilizados atualmente, principalmente o controle químico amplamente utilizado contra o *Meloidogyne incognita* (*Mi*) podem representar riscos ambientais, sociais e a saúde humana. Em função desses impactos, medidas de controle alternativas têm sido estudadas para manejar esses nematoides na agricultura. Diante disso, o objetivo deste estudo foi de avaliar o efeito do BC proveniente do lodo de esgoto-LE ou (BCLE) que é um material rico em C, com quantidades significativas de N, P, K, Ca, Mg, S, preparado nas temperaturas de 300°C (BC300) e 500°C (BC500), por meio da aplicação direta em diferentes concentrações (0,0,0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%), como um método de controle alternativo para a redução da população de (*Mi*) nas raízes de plantas de feijão-caupi. O BCLE foi eficaz no controle de *Mi*, com destaque para as concentrações entre 1,5%, 2,0% e 2,5% de BC300 que proporcionaram uma redução populacional de 91,72%, 80,94%, 79,64% respectivamente. E para BC500 as concentrações de 1,0% 1,5% e 2,0% que obtiveram resultados semelhantes de 82,30%, 82,43 e 82,01% respectivamente, em comparação ao tratamento controle (0,0%). Esses resultados promissores, são um indício que o BCLE pode ser utilizado como uma alternativa sustentável de controle populacional de *Mi*.

Palavra-chave: Controle alternativo, nematoide-das-galhas, *Vigna unguiculata*

SEWAGE SLUDGE BIOCHAR IN THE CONTROL OF *Meloidogyne incognita* IN COWPEA PLANTS

ABSTRACT

In tropical plant-growing regions, nematodes of the genus *Meloidogyne* have caused significant damage to host plants, including cowpea. This crop is expanding in Brazil and in the world, especially in developing countries, where in many cases these pathogens have been a barrier to maintaining the population food security. The main control methods currently used can pose environmental, social, and human health risks. Due to these impacts, alternative control measures have been studied to manage these nematodes in agriculture. Several authors have demonstrated the reduction of infection and infestation by several pathogens, among them some nematodes, using biochar-BC obtained from different raw materials applied to the soil. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of BC from sewage sludge-SS or SSBC, which is a material rich in C, with significant amounts of N, P, K, Ca, Mg, S, prepared at temperatures of 300 °C (BC300) and 500 °C (BC500), as an alternative control method for reducing the population of *Meloidogyne incognita* (*Mi*) in the roots of cowpea plants. The results were different between the temperatures and doses of sewage sludge biochar-SSBC applied, with emphasis on BC300 concentrations of 1.5%, 2.0% and 2.5%, which provided a population reduction of 91.72%, 80.94%, 79.64%, respectively. And for BC500 concentrations of 1.0%, 1.5% and 2.0% that obtained similar results of 82.30%, 82.43 and 82.01% respectively, compared to the control treatment. These promising results are an indication that SSB can be used as a sustainable alternative for population control for this phytopathogen.

Keywords: Alternative control, root-knot nematodes, *Vigna unguiculata*

1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (FC) é uma cultura de subsistência, sobretudo no continente africano onde fica localizado o seu centro de origem genético (FAJINMI, 2019). No Brasil, historicamente nas regiões norte e nordeste esse cultivo exerce um papel fundamental na agricultura familiar (FREIRE-FILHO et al., 2011). Mas também, nessas regiões nos últimos anos tem ocorrido a expansão do cultivo de FC em áreas extensas e com uso de alta tecnologia, na chamada agricultura empresarial (NUNES et al., 2017).

Nesse sentido, com o crescimento da área plantada, aumentaram-se os problemas fitossanitários, principalmente com os nematoides-das-galhas, que são espécies pertencentes ao gênero *Meloidogyne*. Esses nematoides são considerados um problema fitossanitário importante por muitas décadas (GHAREEB et al., 2022). E a mais importante é *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949 (HUSSEY; JANSSEN, 2002). Esta espécie, de difícil controle estabelece uma relação específica, se alimentando e causando estresse e danos severos à planta hospedeira (SIDDIQUE; GRUNDLER, 2018).

Todavia, a principal medida de controle dessa e de outras espécies, durante muitos anos, foi a adoção do controle químico via fumigação do solo (SIKORA; FERNÁNDEZ, 2005). Contudo, o uso excessivo desse método de controle, passou a representar riscos ambientais e à saúde humana, como por exemplo: contaminação dos lençóis freáticos, risco à saúde do trabalhador rural e em alguns casos até fitotoxicidade nas plantas (DESAEGER; WATSON, 2019).

Em função dos impactos ambientais, sociais e da saúde humana, alternativas de controle foram estudadas para controlar o *M. incognita* na agricultura (ZHANG et al., 2022). Entre elas se destacam, o controle genético através da seleção de plantas resistentes (NDEVE et al., 2019). O controle cultural com uso de plantas armadilhas, pousio e solarização do solo e mais recentemente, a utilização de matéria orgânica para favorecer os microrganismos heterotróficos, inimigos naturais desses nematoides (DJIAN-CAPORALINO et al., 2014, 2019; XIE et al., 2016; PEREIRA et al., 2020).

O controle biológico com organismos, aplicados via pulverização ou inoculados em sementes, também cresceu recentemente (ARITA; DA SILVA; MACHADO, 2020). Dessa maneira, outras formas de controle vêm sendo estudadas e nas duas últimas décadas, alguns autores têm demonstrado a redução da infecção e infestação por diversos patógenos entre eles alguns nematoides, através do uso de BC's (PIGNATELLO, 2011;

BONANOMI; IPPOLITO; SCALA, 2015; ELMER; GEORGE; KOHLER; RILLIG, 2016; MEHARI et al., 2015).

Dentro desse último aspecto os autores defendem argumentos baseados em diferentes modos de ação, que podem ser mudanças nos atributos físicos do solo, dificultando a sobrevivência do patógeno (JAISWAL et al., 2014). Outro aspecto, são as mudanças nos atributos químicos e microbiológicos do solo, favorecendo organismos antagonistas (WARNOCK et al., 2007; LEHMANN et al., 2011). Há também relatos de BC's induzindo resistência à patógenos da parte aérea, demonstrando que outros fatores podem estar relacionados ao controle decorrentes desse tipo de aplicação (HAREL et al., 2012).

Portanto, o BC para o controle de doenças em plantas, varia em função do patógeno e da hospedeira, mas de maneira geral, é utilizado para o controle de patógenos habitantes do solo (SRINIVASARAO et al., 2013). No Cerrado, em áreas de Latossolo Vermelho, o BCLE, tem demonstrado resultados positivos em relação a mudanças físicas, químicas e biológicas aumentando a produtividade das culturas agrícolas (FIGUEIREDO et al., 2019).

O BCLE que é um material heterogêneo que atua na estruturação do solo, aumentando os teores de matéria orgânica (MO) e elevando os níveis de colonização de fungos micorrízicos nas raízes (FIGUEIREDO et al., 2019). Em resultados recentes de sua aplicação, têm se mostrado como uma alternativa para o controle de fungos patógenos habitantes do solo, quando associado com *Trichoderma harzianum* dentro das condições de solo e clima do Cerrado (ARAUJO; BLUM; FIGUEIREDO, 2019).

Contudo, ainda não existem dados sobre a atuação do BC sobre nematoides fitoparasitas nas condições edafoclimáticas do Cerrado. Também não existem dados relativos ao controle desse grupo de patógenos com a aplicação de outros biocarvões. Diante disso, o principal objetivo deste estudo é avaliar o efeito do BCLE preparado em diferentes temperaturas e concentrações no controle de *M. incognita* em feijão-caupi cultivado em um Latossolo Vermelho típico da região do Cerrado em casa de vegetação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local e período de realização do ensaio experimental

Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação na Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília/EEB-UnB, localizada em Brasília/DF. No período de dezembro de 2019 a março de 2020, período de clima quente no Distrito Federal-DF com temperatura média de 28 °C. O período total de avaliação experimental foi de 120 dias após semeadura (DAS), ou 90 dias após inoculação (DAI) de *M. incognita* para a avaliação dos parâmetros nematológicos. Esse tempo foi necessário para o ciclo do plantio e para a colheita de vagens das plantas de feijão-caupi.

2.2. Local de coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão

Conforme o CAP. II.

2.3. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos

Conforme o CAP. II.

2.4. Caracterização físico/química do solo e do lodo de esgoto e biocarvão de lodo de esgoto

Conforme o CAP. II.

2.5. Adubação do solo

A adubação e correção do solo no tratamento controle foi realizada com a aplicação de calcário dolomítico, adubação mineral com NPK na formulação (10-10-10), em semeadura e cobertura de acordo com análise de solo realizada antes da montagem do ensaio, seguindo a recomendação para o feijão-caupi cultivado em Latossolos de textura muito argilosa, conforme proposto por Melo e Cardoso (2017).

2.6. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo

Conforme o CAP. II.

2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento

Conforme o CAP. II.

2.8. Origem e manutenção do inóculo de *Meloidogyne incognita*

A população de *Meloidogyne incognita* (*Mi*) foi proveniente de um levantamento da ocorrência de espécies de nematoides fitoparasitas da cultura do feijão-caupi em regiões produtoras do Brasil (Norte, Nordeste e Centro-oeste). O inóculo foi coletado em campo a partir de plantas infectadas naturalmente em lavouras comerciais no município de Dom Eliseu-PA (DIAS, 2020). Sendo posteriormente caracterizado como *Mi* (Figura 1), pelas análises isoenzimáticas da esterase com perfis avaliados em gel de poliacrilamida e comparados com outras populações de *Mi* e com o controle *M. javanica* (CARNEIRO; ALMEIDA, 2001).

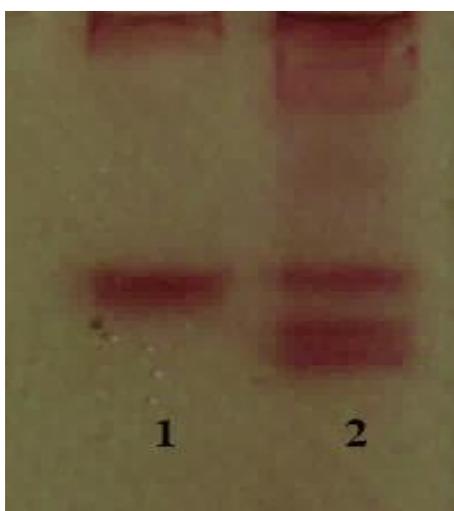


Figura 1. Perfil isoenzimático de esterase em gel de poliacrilamida 10% para identificação de *Meloidogyne* spp. ¹Perfil da população utilizada nos ensaios confirmando a espécie *Meloidogyne incognita*, e ²Perfil da espécie *Meloidogyne javanica* utilizada como padrão diferenciador.

O inóculo foi mantido em plantas de tomate cultivar Santa Clara, semeadas em bandejas contendo substrato Bioplant® e mantidas em casa de vegetação durante aproximadamente 15 dias, em temperatura variando entre 18° e 33° C. Após esse período, as plântulas foram transferidas para vasos plásticos de 20 x 30 cm x 16 cm, contendo cerca de 7.665 cm³ da mistura estéril de solo, substrato comercial Bioplant® e areia na proporção de 4:2:4, respectivamente. As plantas foram adubadas e irrigadas com 70% da capacidade de campo, durante o tempo de permanência na casa de vegetação.

Após os 30 dias do transplântio, foram inoculadas com 10.000 ovos de *Mi* para a sua multiplicação. E após os 90 DAI as plantas de tomateiro tiveram a parte aérea retirada, e nos vasos com as raízes de tomateiro infectadas por *Mi*, foram plantadas três sementes

do cultivar BRS-Tumucumaque que é suscetível ao nematoide, sendo mantidas por 90 dias até a realização da extração.

2.9. Inoculação das Plantas de feijão-caupi cultivadas em vasos contendo Biocarvão

A inoculação das plantas foi feita com a suspensão de ovos e eventuais juvenis de segundo estágio recém eclodidos (J_2) 30 DAS do FC nos vasos contendo as diferentes concentrações de BCLE. A calibração do inóculo foi realizada em lâmina de contagem de Peter, com a utilização de microscópio óptico de luz para a concentração de 5.000 ovos e/ou juvenis recém eclodidos (J_2) de *Mi* por planta. A suspensão do inóculo foi calibrada para 1.000 ovos e J_2 por ml e o inóculo foi aplicado com o auxílio de uma pipeta, depositando-se 1 ml da suspensão por orifício, num total de 5 orifícios por vaso, distantes 2 a 3 cm do caule da planta. Após a aplicação da suspensão de ovos e J_2 os orifícios foram tampados com o solo segundo metodologia proposta por Machado et al., (2019).

2.10. Extração de ovos e J_2 a partir de plantas de feijão-caupi

Aos 90 DAI as plantas de FC, com o sistema radicular infectado pelo nematoide, tiveram os ovos e juvenis de segundo estágio (J_2) extraídos segundo o método descrito por Hussey; Barker (1973) e modificado por Boneti; Ferraz (1981). Dessa forma, as raízes das plantas de FC foram separadas da parte aérea, lavadas em água corrente, cortadas em pequenos fragmentos (~1 cm) e trituradas em liquidificador por 30 segundos em solução de hipoclorito de sódio (NaOCl 0,5%). A suspensão foi passada em peneiras de 50, 200 e 500 mesh e lavada em água corrente para a retirada do excesso de hipoclorito. O conteúdo retido na peneira de 500 mesh, contendo os ovos e J_2 , foi lavado com água e a suspensão de nematoides recolhidas em béquer e armazenados em tubos para ultracentrifugação de 50 ml do tipo falcon.

2.11. Avaliação dos parâmetros utilizados relativos à infecção por *Meloidogyne incognita*

As plantas infectadas com *MI* foram avaliadas aos 90 DAI. A temperatura média na casa de vegetação durante o experimento foi de 19°C (mínima) e de 33°C (máxima). A massa fresca da parte aérea (MFPA) e a massa fresca de raiz (MFR) foram medidas em uma balança eletrônica de precisão (Gehaka®, modelo BG-100 AS-BI). A massa seca da parte aérea (MSPA) foi medida em balança de precisão, após a secagem do material vegetal em estufa na temperatura de 60° até que o peso do material estivesse constante.

A população final de nematoides por raiz (PFNR) foi quantificada com a retirada de uma alíquota de (1 ml) da solução de (ovos e J₂) extraídos de cada raiz, que foi depositada sobre a lâmina de contagem de Peter e visualizada sob um microscópio de luz (Nikon, Modelo Eclipse E200). Foram realizadas três contagens do número de ovos e eventuais juvenis recém eclodidos (J₂) para cada repetição, sendo utilizado como valor final o resultado da média dessas três contagens. O Número de nematoides (ovos e J₂) por grama de raiz (NNGR) foi calculado a partir da divisão do PFNR pelo peso da MFR.

Fator de reprodução (FR) foi calculado de acordo com a equação $FR = Pf/Pi$ em que *Pf* corresponde ao PFNR e *Pi* que corresponde população inicial, que é a quantidade de inóculo depositado inicialmente no sistema radicular da planta (5.000 ovos + J₂), segundo metodologia descrita por Oostenbrink (1966).

2.12. Análise de solo e das plantas

As análises de solo foram feitas conforme descrito no CAP-II. As análises das plantas inoculadas com *M. incognita* foram feitas da coleta de todos os tecidos da parte aérea da planta após avaliação da MSPA. De onde foram tiradas amostras compostas para cada tratamento avaliado.

2.13. Delineamento e análises estatísticas utilizadas na avaliação do experimento

O experimento foi avaliado em esquema fatorial (2 x 7), ou seja, 14 tratamentos avaliados, sendo duas temperaturas de preparo do BCLE e sete concentrações aplicadas para cada temperatura de preparo, onde foram avaliadas seis plantas para cada concentração, sendo uma planta por repetição, em um total de 6 repetições, distribuídas em delineamento inteiramente casualizado. Foram avaliadas 42 plantas para cada temperatura de pirólise, somando-se as duas temperaturas, totalizou 84 plantas avaliadas.

Os dados obtidos foram tabulados no EXCEL® e para cada parâmetro, submetidos à análise de variância F ($F \leq 0,05$). Para a análise dos parâmetros nematológicos e das propriedades químico/físicas do solo e nutricionais nas plantas, foi realizada a análise de regressão ($P \leq 0,05$). Os cálculos referentes às análises estatísticas foram executados, utilizando o software SISVAR, desenvolvido na Universidade Federal de Lavras- UFLA (FERREIRA, 2019).

As taxas de aumentos ou reduções nos parâmetros avaliados apresentados em porcentagens, foram calculadas de acordo com a seguinte equação: (%) = [(valor médio da testemunha – valor médio da concentração)/ valor médio da testemunha] × 100.

3. RESULTADOS

3.1. Mudanças na fertilidade química do solo

A aplicação dos BC's de LE, produzidos nas temperaturas de pirólise de 300 °C e 500 °C, proporcionaram o incremento de diferentes nutrientes no solo. Doses variando de 0,5 a 3,0% aumentaram os teores de macronutrientes, P, K, Ca, Mg e S. As doses crescentes do BCLE quando aplicadas no solo após os 120 DAS do FC resultaram em aumentos significativos dos teores desses nutrientes (Figura 2).

A aplicação de diferentes doses, foi responsável pelo aumento de pH do solo em relação ao controle, sendo essa resposta observada até mesmo em menores concentrações, em ambos BC's. Porém, observou-se um aumento nas maiores concentrações avaliadas do BC500 em relação ao BC300 (Figura 2A).

O BCLE neste estudo resultou em incremento de matéria orgânica no solo, com aumentos variando de 1,4 a 33,91% para o BC300 e de 18,30% a 39,03% BC500, variando conforme a concentração avaliada (Figura 2B). De forma semelhante, doses crescentes de ambos BC's proporcionaram um aumento significativo da capacidade de troca de cátions (CTC) (mmolc/dm^3) do solo. Houve um aumento superior a 70% nos valores de CTC em relação à testemunha quando adotada a dose do BC500 3,0% (Figura 2C).

A aplicação da menor dose de BC300 foi responsável por um aumento de mais de 170% do teor de P (mg/dm^3) no solo quando comparado com o controle (0,0%). Esse aumento foi ainda mais expressivo quando utilizado o BC500, visto que a dose de 0,5% resultou em um aumento superior a 720% do teor de P em relação ao controle (Figura 2D).

O aumento de Ca no solo foi evidenciado em todas as doses de BC300, e em doses acima de 1,5% do BC500. Resultado bastante expressivo quando utilizada a dose de 3,0% do BC 300, sendo verificado um incremento de 85,56% do teor desse nutriente no solo em relação ao controle (Figura 2F).

O conteúdo de enxofre no solo, evidenciado em ambos BC's, pode ser observado até mesmo em menores doses. O teor de S (mg/dm^3) no solo aumentou aproximadamente 280% após aplicação da dose de 0,5% do BC300. Os resultados para o BC500 nessa mesma dose foram menos expressivos, evidenciando um aumento de 53,73% do teor de S no solo somente a partir de 1,0% (Figura 2H).

O BCLE aumentou os teores de micronutrientes no solo, onde BC300 se sobressaiu ao BC500 no incremento de Zn no solo. Desde as menores doses de BC300 foi possível observar um aumento significativo dos teores desse micronutriente no solo em relação ao controle (Figura 3A). Para se alcançar resultados similares a esse através do uso do BC500 em comparação com o controle, foi preciso adotar doses superiores ou iguais a 1,5%.

Resultados semelhantes foram observados em relação ao cobre, demonstrando a maior capacidade de fornecimento desses dois micronutrientes pelo BC300 em comparação ao BC500. Os teores de B foram inferiores ao controle para o BC500 (Figura 3D). Os teores de ferro e cobalto aumentaram com a aplicação de BCLE, com teores semelhantes entre as concentrações de ambas as temperaturas (Figura 3E e F). Portanto, o BCLE em ambas as temperaturas de pirólise aumentou significativamente os teores de micronutrientes no solo (Figura 3).

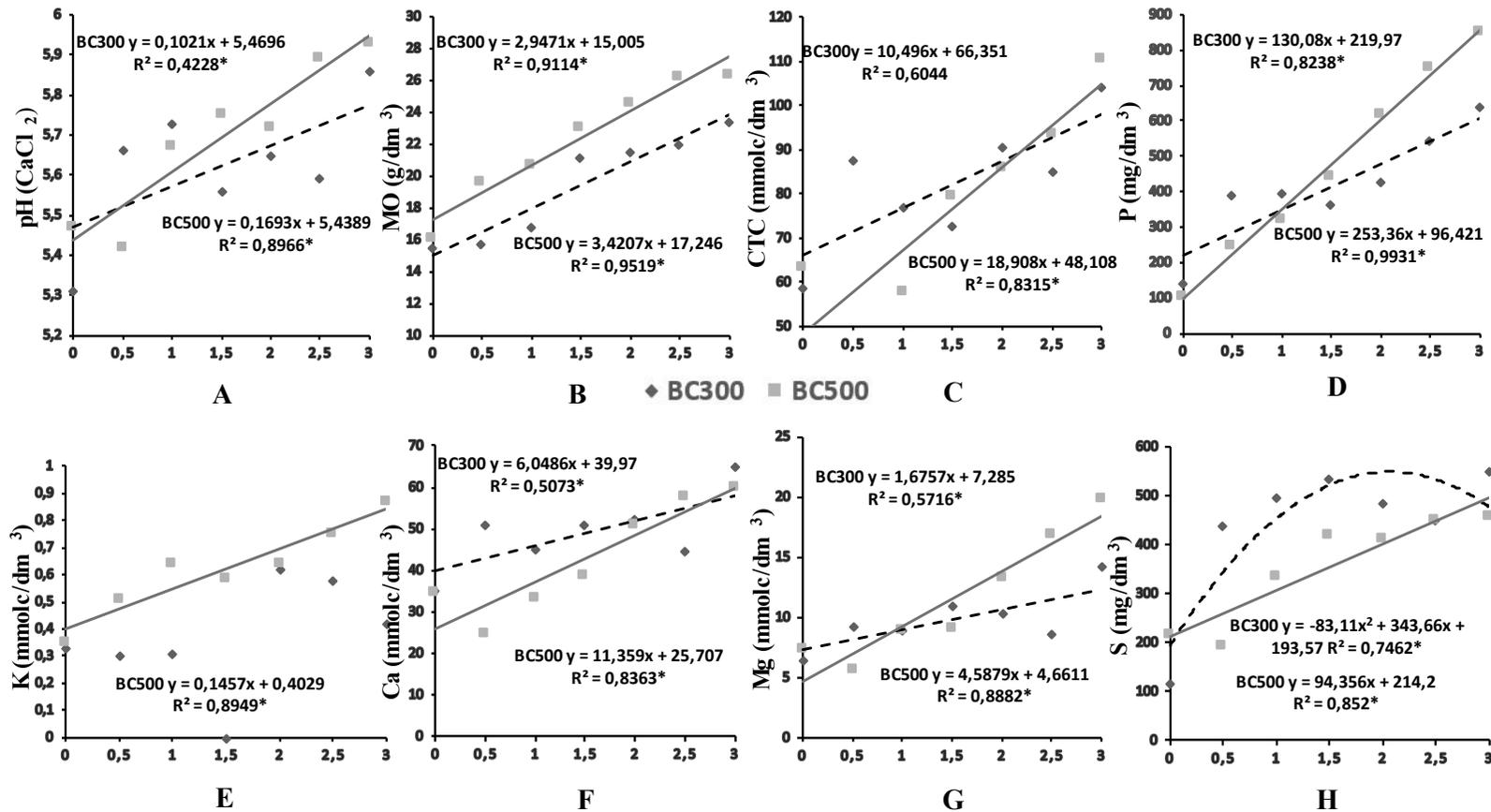


Figura 2. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas propriedades e macronutrientes no solo. **A:** potencial hidrogeniônico, **B:** matéria orgânica, **C:** capacidade de troca catiônica, **D:** fósforo, **E:** potássio, **F:** cálcio, **G:** magnésio, **H:** enxofre. Equação com valor de R² seguida por (*) foi significativa pelo teste de regressão (p ≤ 0,05). Dados com ausência de linhas e equações não apresentaram diferença estatística significativa para a equação de regressão.

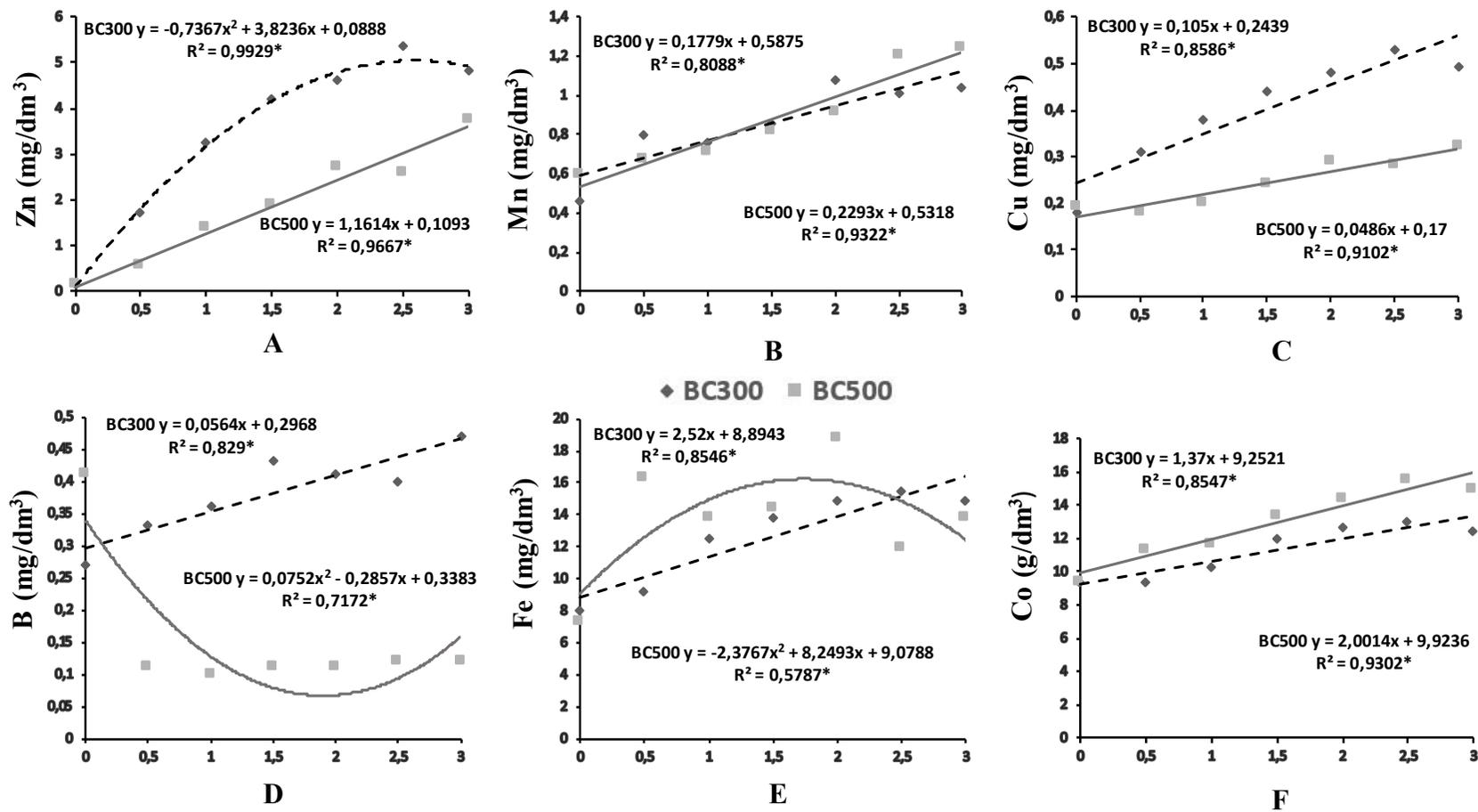


Figura 3. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos micronutrientes no solo. A: zinco, B: manganês, C: cobre, D: boro, E: Ferro, F: Cobalto. Equação com valor de R² seguida por (*) foi significativa pelo teste de regressão (p ≤ 0,05).

3.2. Análise nutricional da planta de feijão-caupi

A aplicação dos BC's de LE, produzidos em temperaturas de pirólise de 300 °C e 500°C, apresentaram diferenças entre as concentrações aplicadas, para os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) nas plantas ao final do ciclo de cultivo. O BC300 apresentou diferença significativa para o N, P e Mg (Figura 4). O BC300 0,5% aumentou os teores de N em 118% em relação ao controle se destacando das demais concentrações. No entanto, o aumento médio de N nas demais concentrações foi 62,07%. Já o BC500 só obteve um teor de N maior com a aplicação de 2,5%, aumentando somente 5,88%. Nas demais concentrações de BC500 os teores foram inferiores ao controle, ou seja, não houve diferença significativa para o N (Figura 4A).

Os aumentos de P nas plantas foram maiores nas menores concentrações de BC300 em comparação ao BC500 com aumento de 184% no BC300 1,0%. Nas maiores concentrações o BC500 teve maiores teores desse nutriente (Figura 4B). Já para o K os aumentos foram maiores com a aplicação do BC300 em comparação ao BC500 que só aumentou os valores em relação ao controle a partir da concentração 2,5% (Figura 4C).

Os aumentos de Ca e Mg foram semelhantes ao de K, apresentando maiores teores para o BC300 nas concentrações abaixo de 2,5% (Figura 4D e E). O BC300 para o enxofre, só foi maior ao controle na menor concentração 0,5% e com uma pequena variação de 9,73%. Já o BC500 nesse nutriente teve valores maiores que o controle em todas as concentrações, com destaque para a concentração de 1,0% que aumentou 156,42% (Figura 4E).

A aplicação do BCLE também modificou os teores de micronutrientes nas plantas aumentando os teores de (Fe, Mn, Cu, Zn e B), dependendo da concentração e temperatura de pirólise. Porém, os aumentos desses nutrientes nas plantas foram significativos somente para o Fe e Mn (Figura 5). Os teores de Fe aumentaram em ambas as temperaturas, com destaque para o BC300 1,0% com aumento de 132,89% em relação ao controle, sendo o maior teor entre todas as concentrações (Figura 5A). O Mn aumentou em todas as concentrações de ambas as temperaturas, porém com maiores teores no BC300 (Figura 5B). Os teores de Cu foram menores ou iguais ao controle em todas as concentrações de BC300. Diferente do BC500 que teve maiores teores em todas as concentrações aplicadas em relação ao controle (Figura 5C).

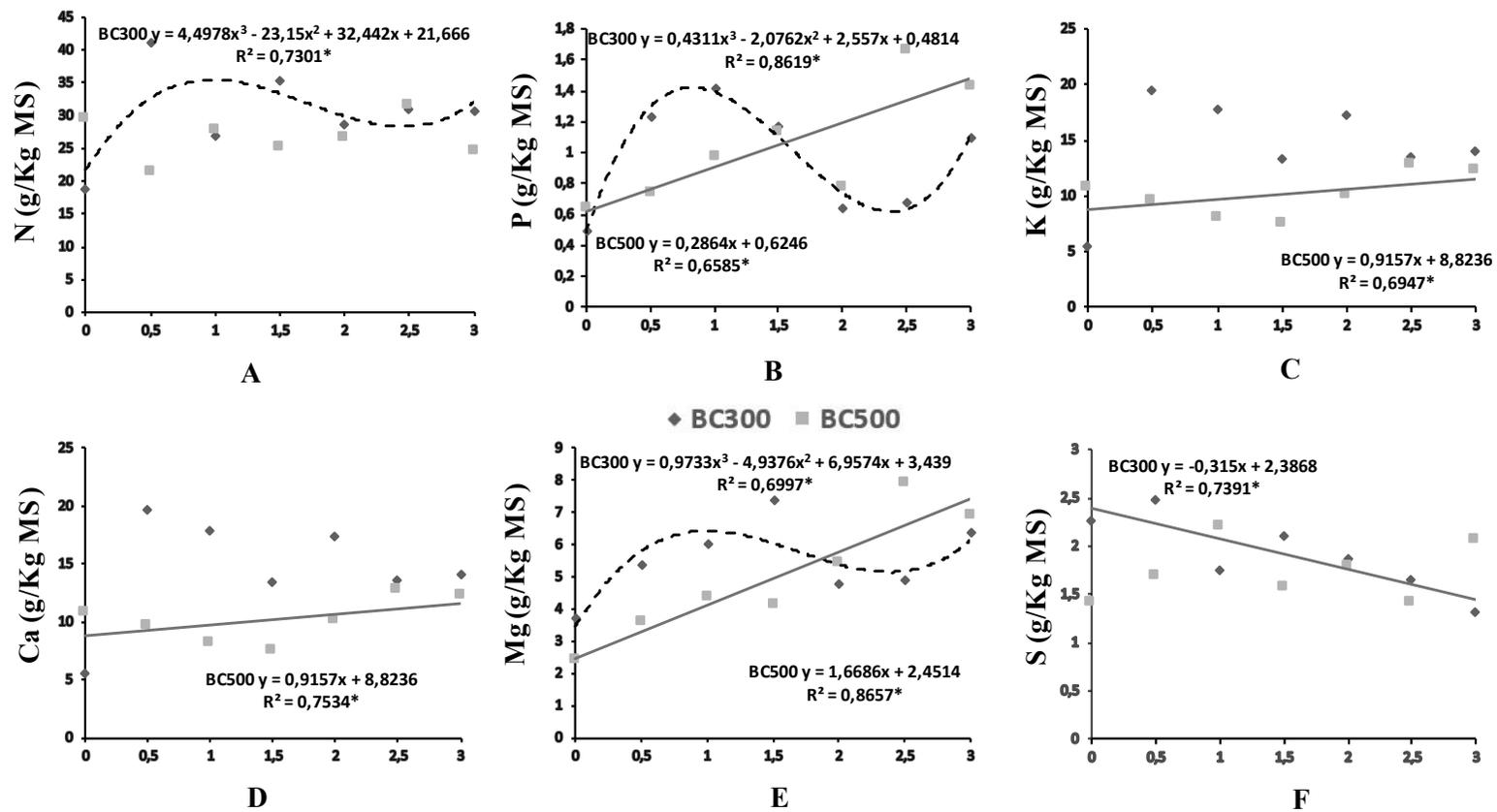


Figura 4. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos macronutrientes na planta. **A:** nitrogênio **B:** fósforo, **C:** potássio, **D:** cálcio, **E:** magnésio, **F:** enxofre. Equação com valor de R^2 seguido por (*) foi significativa pelo teste de regressão ($p \leq 0,05$). Dados com ausência de linhas e equações não apresentaram diferença estatística significativa para a equação de regressão.

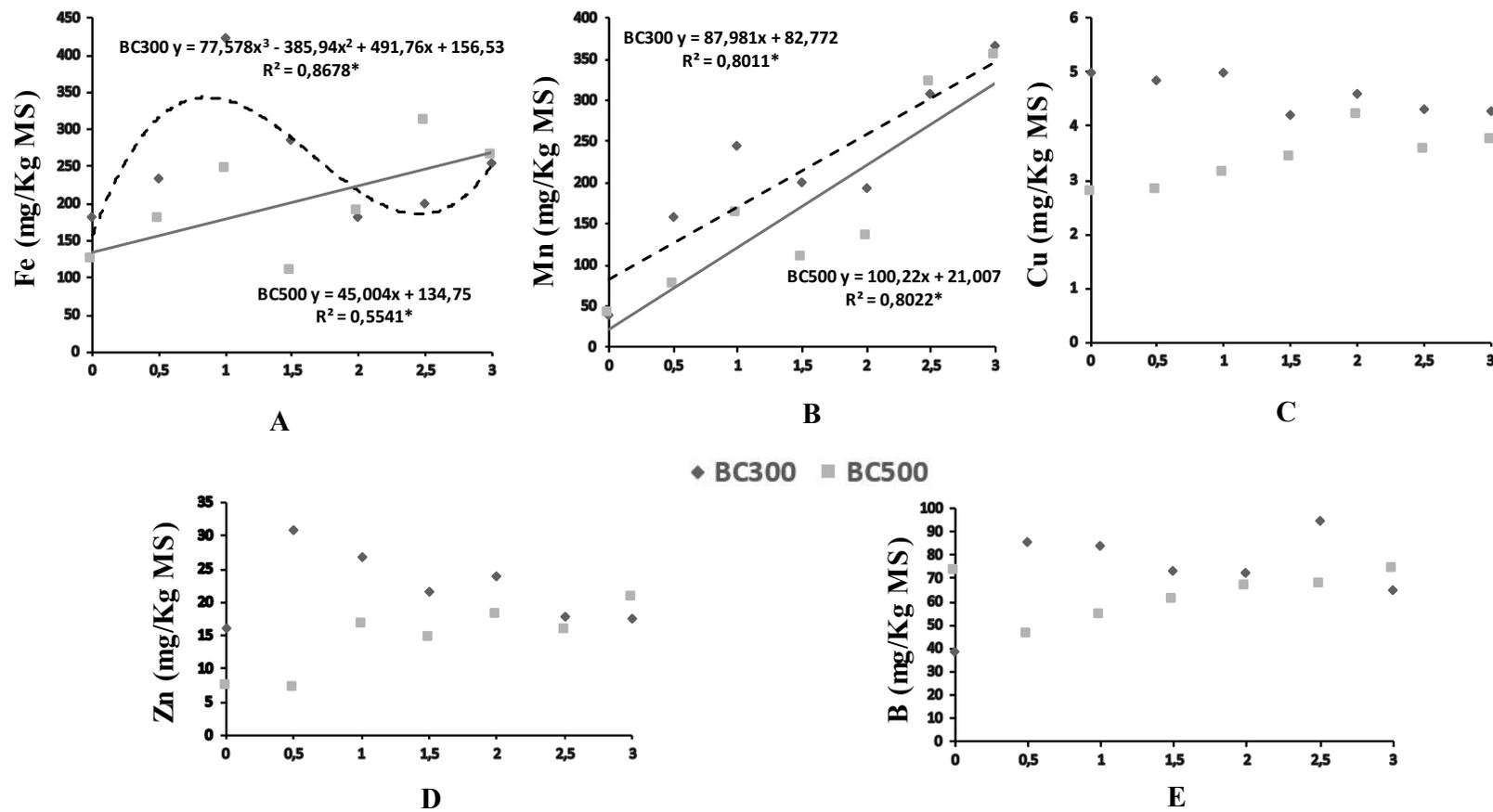


Figura 5. Efeito da dose (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nos micronutrientes na planta. **A:** ferro, **B:** manganês, **C:** cobre, **D:** zinco, **E:** boro. Equação com valor de R^2 seguido por (*) foi significativa pelo teste de regressão ($p \leq 0,05$). Dados com ausência de linhas e equações não apresentaram diferença estatística significativa para a equação de regressão.

3.3. Crescimento em altura, produção de vagens, massas frescas e secas da parte aérea de plantas de feijão-caupi inoculadas com *Meloidogyne incognita*

A aplicação do BCLE promoveu diferenças no crescimento em altura das plantas que receberam as diferentes concentrações nas temperaturas de pirólise avaliadas. A altura das plantas que receberam a aplicação do BC300 foi maior nas concentrações de 0,5% e 1,0% ocorrendo redução no crescimento nas demais concentrações. Para o BC500 houve maior crescimento com a menor concentração aplicada, com crescimento similar nas demais concentrações (Figura 6A).

Houve uma maior produção das plantas que receberam a aplicação do BCLE independente da temperatura de pirólise (Figura 6B). Entre o BC300 3,0% com produção de 4,07 g por planta e o controle com produção de 1,06 g por planta, houve um aumento de mais de 380% de massa das vagens. Com relação ao BC500 houve um aumento gradual da produção das plantas conforme aumentou-se a concentração de BC500 chegando a um aumento médio de 400% na maior concentração aplicada.

As medidas das massas da parte aérea foram semelhantes para a MFPA das plantas que receberam a aplicação do BCLE em ambas as temperaturas (Figura 6C). O mesmo aconteceu para o parâmetro MSPA onde houve diferença com a maiores massas com valores médios de 2,62g para o BC300 e BC500 3,0% e a menores massas com valores médios de 1,11g para o controle, ou seja, um aumento médio de 236% com a aplicação da maior concentração (Figura 6D).

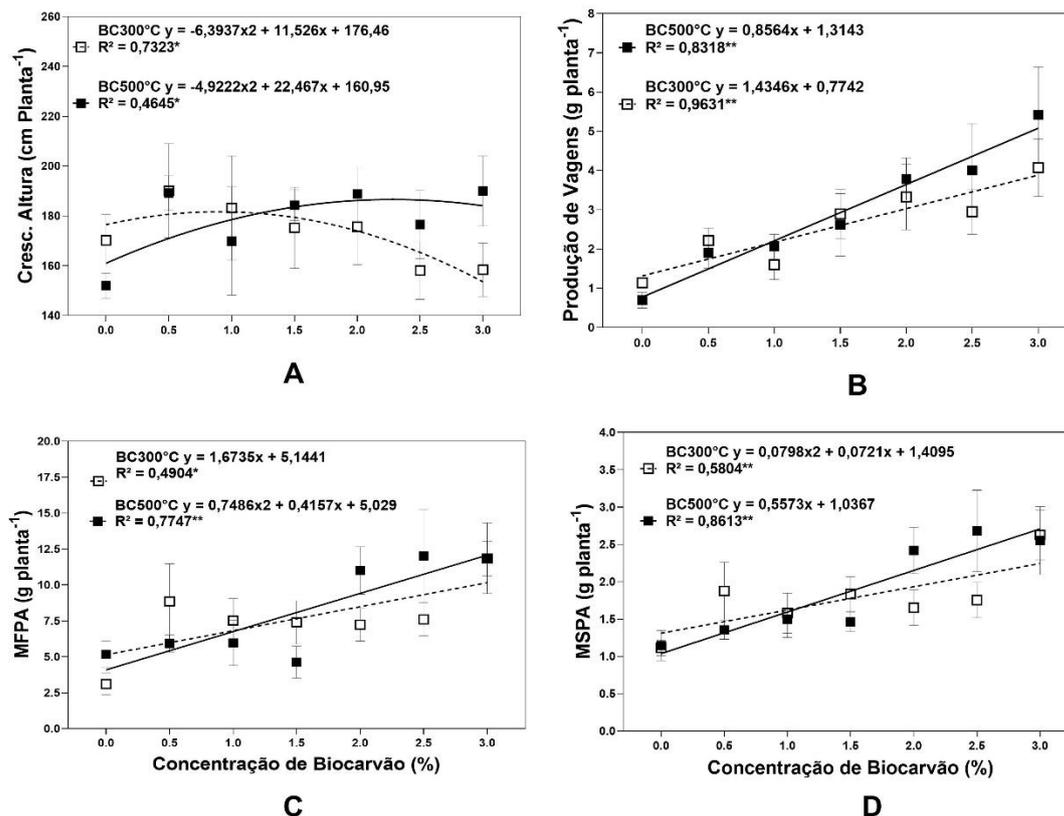


Figura 6. Crescimento em altura (A), produção de vagens por planta (B) massa fresca da parte aérea-MFPA (C) e massa seca da parte aérea-MSPA (D) de plantas de feijão-caupi, cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho com diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) e inoculadas com *Meloidogyne incognita*. Coeficiente da equação de regressão R^2 seguido por * foi significante a ($p \leq 0,05$) e ** a ($p \leq 0,01$). As barras indicam o erro padrão das médias.

3.4. População final de nematoides na raiz, fator de reprodução, massa do sistema radicular e número de ovos por grama de raiz de plantas de feijão-caupi inoculadas com *Meloidogyne incognita*

Houve uma redução significativa na população final dos nematoides nas raízes de FC (PFNR) com a aplicação do BCLE (Figura 7A). Dessa forma, se destacando o BC300 1,5% com valor médio de 20.879 nematoides na raiz, seguido do BC300 2,0% com valor médio de 48.008 nematoides. Portanto, a redução populacional com BC300 em relação ao controle, nas duas concentrações, foi de 91,72%, 80,94% respectivamente.

Nesse sentido, mesmo com o BC300 nas menores concentrações, houve uma redução de até 50% na população final de nematoides no sistema radicular das plantas de FC em relação ao controle. Para o BC500 em relação PFNR, o BC500 1,0%, 1,5% e 2,0%, apresentaram médias similares, com 43.195, 42.883 e 43.908 ovos e J_2 de *Mi* na raiz,

respectivamente. O controle, sem aplicação de BC, apresentou o maior valor para esse parâmetro com média de 244.083 ovos e J_2 por planta. Para o cálculo da PFNR foi levado em conta todo o sistema radicular da planta, que não se diferenciou em relação a massa fresca com a aplicação do BCLE (Figura 7C).

Contudo, para os valores correspondentes ao número de nematoides (ovos e J_2) por grama de raiz. A aplicação do BC300 reduziu o NNGR a partir da concentração de BC300 1,5% que foi a concentração que apresentou o menor valor para esse parâmetro com média de 9.855 nematoides por grama de raiz. O BC500 também apresentou reduções nas concentrações até 2,5%, resultado semelhante em ambas as temperaturas de preparo (Figura 7D).

Para o fator de reprodução houve resultados semelhantes a PFNR e NNGR para as plantas que receberam a aplicação do BC300. Com destaque para o BC300 1,5% que apresentou menor valor 4,17. A partir do tratamento BC300 2,5% houve um aumento do FR, semelhante ao encontrado no controle com o maior valor de FR de 50,39 que corresponde a um aumento de 91,72% em relação ao tratamento BC300 1,5%.

Ao analisarmos o BC500 os menores valores de FR, foram para o BC500 1,5%, 1,0% e 2,0% com 8,63, 8,57 e 8,78 respectivamente. O tratamento BC500 0,5% apresentou uma média de 17,1 mostrando que com uma aplicação de BC500 na menor concentração, já houve uma redução significativa de 64,96% do FR em relação ao controle. Já os tratamentos com as maiores concentrações de BC500 2,5 % e 3,0% apresentaram valores de 21,55 e 34,35 respectivamente, que mesmo sendo superiores as demais concentrações, apresentaram uma redução de 55,84% e 29,62% em relação ao controle. Dessa forma, todas as plantas que receberam o BC300 e BC500 apresentaram menores médias de FR que o controle com 48,81, o maior valor encontrado (Figura 7B).

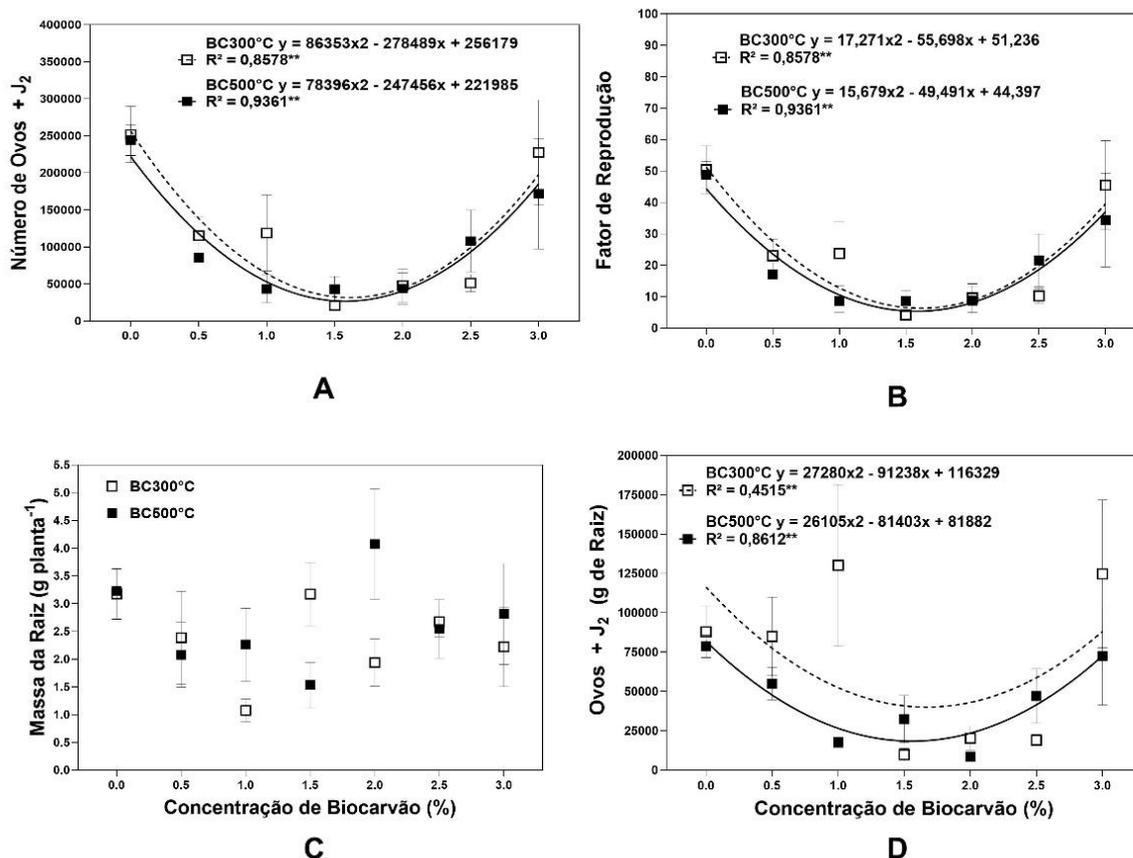


Figura 7. População final de nematoides (ovos e J₂) na raiz-PFNR (A), fator de reprodução-FR (B), massa fresca da raiz-MFR (C), número de nematoides (ovos e J₂) por grama de raiz-NGR (D) em plantas de feijão-caupi inoculadas com *Meloidogyne incognita* e cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho, com a adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C). Coeficiente da equação de regressão R² seguido por * foi significativa a (p ≤ 0,05) e ** a (p ≤ 0,01). Dados com ausência de linhas e equações não apresentaram diferença significativa para a equação de regressão. As barras indicam o erro padrão das médias.

Contudo, de acordo com os dados apresentados acima, verifica-se que houve uma redução populacional do patógeno nos sistemas radiculares das plantas com a aplicação do BCLE. Nesse sentido, é possível observar essa redução de maneira qualitativa na (Figura 8) que apresenta um exemplo das amostras das raízes infectadas por *Mi* de cada tratamento avaliado ao final do ciclo de cultivo.



Figura 8. Sistema radicular de plantas de feijão-caupi após 90 dias da inoculação com *Meloidogyne incognita*, em plantas cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho, com a aplicação de diferentes concentrações (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0%) de biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C). (A) Controle-BC300-0,0%, (B) BC300-0,5%, (C) BC300-1,0%, (D) BC300-1,5%, (E) BC300-2,0%, (F) BC300-2,5%, (G) BC300-3,0%, (H) Controle-BC500-0,0%, (I) BC500-0,5%, (J) BC500-1,0%, (L) BC500-1,5%, (M) BC500-2,0%, (N) BC500-2,5%, (O) BC500-3,0%.

4. DISCUSSÃO

O BCLE através da aplicação direta, foi capaz de aumentar os teores de macro e micronutrientes no solo e nas plantas. Se diferenciando, nas temperaturas de pirólise e concentrações aplicadas, semelhante a outros BC's preparados em temperaturas de pirólise de 200°C (torrefação) a 800°C, que aumentaram os teores de cinzas, pH, estabilidade do carbono, MO e nutrientes como: N, P, K, Ca e Mg, conforme o aumento da temperatura de pirólise (AL-WABEL et al., 2013).

Apesar do aumento do teor de nutrientes no solo com a aplicação do BC, eles podem não estar prontamente disponíveis para as plantas de FC. Pois geralmente, contribuem apenas com fração do total de nutrientes que estão disponíveis no solo (YUAN et al, 2016). Wu et al. (2011). descobriram que apenas 15% a 20% de cálcio (Ca), 10% a 60% de fósforo (P) e apenas 2% de nitrogênio (N) de um BC podem estar em formas disponíveis às plantas.

Nesse sentido, a disponibilidade desses nutrientes está ligada também à temperatura de pirólise do LE. Por exemplo, quando preparado em temperaturas mais altas pode apresentar maiores quantidades de N, P e K menos solúveis (YUAN et al. 2016). E isso foi evidenciado neste estudo, onde o BC500 aumentou os níveis de P e K, em relação ao BC300, que apresentou maiores teores de outros nutrientes como Ca e enxofre. Houve também mudanças em outros fatores no solo como o aumento da MO, pH e CTC

conforme relatados em outros estudos com BC's (WARNOCK et al., 2007; AMONETTE; JOSEPH, 2009; ZORNOZA et al., 2016).

Demonstrando, que o BCLE é um material rico em nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas (YUAN et al., 2016). Dessa maneira, foi evidenciado que nas plantas de FC também houve maior assimilação de nutrientes com a aplicação de BCLE, aumentando todos os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B) essenciais, com variações entre as temperaturas de pirólise e as concentrações avaliadas, levando a uma maior disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas no BC300 e BC500 com consequente aumento de MFPA e MSPA.

Deste modo, ao final do ciclo da planta, o BCLE gradativamente com o aumento da concentração, aumentou a produção de vagens por planta, semelhante aos resultados com esse material em condições de campo, que tem proporcionado aumentos significativos na melhoria da estrutura do solo e produtividade do milho nas condições edafoclimáticas do Cerrado (FIGUEIREDO et al., 2019). Assim como, os resultados obtidos com outros tipos de BC, que aumentaram o desenvolvimento e produção de plantas leguminosas como a soja e de gramíneas como o trigo (EGAMBERDIEVA et al., 2016; AGEGNEHU; NELSON; BIRD, 2016; MANOLIKAKI; DIAMADOPOULOS, 2019).

Portanto, para o aumento da produção das culturas agrícolas a melhoria na fertilidade dos solos é essencial, e ela não influencia somente nesse aspecto. Fertilizantes em casos específicos, podem ser tóxicos ao patógeno ou suprimir a sua multiplicação na planta, reduzindo o dano através de mudanças na nutrição do hospedeiro (VIAENE; COYNE; DAVIES, 2013). Em culturas, como o pepino *Cucumis sativus* L. cv. Negin, o teor maior de nutrientes no solo reduziu o número de galhas de *Mi* em até 96% quando comparado com o controle (MANSOURABAD; BIDEH; ABDOLLAHI, 2016).

No entanto, uma nutrição mais abundante das plantas pode ser fator determinante para o desenvolvimento de alta população de *Mi* (NISHANTHA et al., 2020). Por outro lado, as plantas são incapazes de tolerar os danos de *Mi* em solos degradados, ou com baixos teores nutricionais e de MO (ROSTAMI et al., 2021). Esse aumento ou redução da população do nematoide somente através da fertilidade do solo ou da nutrição da planta depende de diversos fatores, e a suscetibilidade da hospedeira é o principal. Neste estudo, mesmo com a adubação recomendada para a cultura resultou em um nível populacional elevado de *Mi* nas raízes de FC. E isso é um ponto chave, pois uma adubação em excesso, com uso indiscriminado de fertilizantes inorgânicos ou ausência de nutrientes nos solos levam ao aumento da incidência de *Mi* em áreas cultivadas (NISHANTHA et al., 2020).

Desde os primeiros relatos sobre solos condúctivos a esse patógeno, ou seja, aqueles com alta infestação de *Mi*, os principais fatores ligados a essa condição eram a fertilidade, os níveis de carbono e MO nesses solos, que quase sempre estavam 50% mais baixos do que em seus estados naturais (WINDHAM; BAKEE, 1986). Por outro lado, os solos supressivos a *Mi*, são solos com alto teores de MO e que fornecem uma nutrição balanceada às plantas (SANTANA-GOMES et al., 2013). Com isso, somente com a aplicação do BCLE na concentração de 1,0%, os níveis de matéria orgânica foram aumentados em média mais de 30%. Demonstrando que com a aplicação desse material, mesmo nas menores concentrações, em pouco tempo o solo dos vasos adquiriu características importantes de solos considerados supressivos.

Nesse sentido, com uso do BCLE a planta assimilou uma quantidade necessária de nutrientes, mas não em excesso, o que pode ter influenciado na interação de *Mi* com a hospedeira. Mas, houve menores teores nutricionais nas plantas de FC com maiores populações de *Mi* mesmo com a presença dos nutrientes no solo com a aplicação de BC300, BC500 e controle. E isso é um indício da atuação do nematoide, que em função de níveis maiores de parasitismo no sistema radicular, diminui a absorção de nutrientes, prejudicando o desenvolvimento e produção das plantas (PANDEY; NAYAK, 2019).

As avaliações mostram que *Mi* foi capaz de infectar e reproduzir nas plantas com as diferentes concentrações de BCLE. Percebe-se, entretanto, que *Mi* foi capaz de estabelecer populações com quantidades diferentes de nematoides por grama de sistema radicular nas diferentes concentrações. Portanto, em relação aos efeitos do BCLE na infecção e parasitismo do nematoide, cada parâmetro demonstra um aspecto desse efeito no patógeno e na planta de FC.

Por exemplo, na MFR, com a inoculação do *Mi* a massa da raiz foi afetada pela formação das galhas radiculares. Dessa forma, no presente estudo não se pode associar maiores valores de MFR como resultado da presença e atuação do BC isoladamente, pois maiores massas podem também indicar maiores índices da infecção do *Mi*. Nesse sentido, o tratamento controle apresentou uma alta população de nematoides na raiz e está entre os tratamentos com a maior MFR. Provavelmente, isso ocorreu porque, em função do parasitismo do nematoide, normalmente há a formação de galhas, devido a hiperplasia celular induzida pelo nematoide, o qual acaba por aumentar a massa do sistema radicular (SIDDIQUE; GRUNDLER, 2018).

Portanto, dentro dos aspectos do BC associados ao controle de algumas nematoses, esse material é capaz de diminuir os danos desse grupo de fitoparasitas, através de vários

mecanismos de ação, que estão ligados diretamente às concentrações aplicadas (LEHMANN et al., 2011). Nota-se que o BC300 3,0% e BC500 2,5% e 3,0% apresentaram uma maior população de *Mi* nas plantas, ou seja, nas maiores concentrações, não havendo controle ou redução da população do nematoide em comparação com concentrações menores. Esses diferentes resultados entre as temperaturas de pirólise e as concentrações de BCLE, corroboram com resultados de estudos semelhantes. Em um estudo anterior já havia concluído que o uso de BC's preparados com outras matérias-primas tiveram sua ação diminuída ou invalidada sobre fitopatógenos quando aplicados em altas concentrações (RAFIQ et al., 2020).

Em outro estudo semelhante, verificaram-se diferenças populacionais nas raízes de cenoura infectadas com *Pratylenchus penetrans* (Cobb, 1917) Filipjev, Schuurmans & Stekhoven, 1941, com aplicação de BC preparado a 500 °C em diferentes concentrações (GEORGE et al., 2016). As diferenças populacionais ao final do ciclo das plantas, indicam maiores reduções na população de *Mi* com a aplicação do BC300 entre 1,5% e 2,5%, e para o BC500 entre 1,0% e 2,0%, ou seja, para o BC300 foram necessárias maiores concentrações para resultados semelhantes ao BC500 na redução populacional de *Mi*. Outro estudo também apresentou diferenças nas taxas populacionais de nematoides em decorrência da aplicação de diferentes concentrações de BC (HUANG et al., 2015).

No presente estudo, houve um intervalo em que as concentrações de BCLE nas diferentes temperaturas foram eficazes, semelhante a outros relatos com patógenos diferentes, como por exemplo o *M. graminicola* Golden & Birchfield, 1965 (HUANG et al., 2015). Isso demonstra que os BC's atuam de diferentes formas no solo, influenciando sobre o patógeno e a sua relação com a planta hospedeira (ELAD et al., 2010; HADAR; PAPADOPOULOU, 2012; POSTMA et al., 2013; MEHARI et al., 2015). Além disso, deve-se destacar que o LE é um material que não tem uma uniformidade na origem, sendo variável de acordo com a região de coleta e aspectos relacionados ao tratamento, que influenciam na composição final do material obtido (FACHINI et al., 2021).

Dessa forma, fazem-se necessário mais estudos em relação à disponibilidade de nutrientes do BCLE e a sua influência em diferentes patossistemas, uma vez que o emprego de BC's para o controle de doenças de plantas ainda é limitado, apesar da existência de alguns dados já publicados (BONANOMI et al., 2018). Apesar de incipientes, os estudos revelaram que, embora baixas concentrações ($\leq 1\%$) de BC suprimam várias doenças, concentrações mais altas ($> 3\%$) chegam a ser ineficazes

(FRENKEL et al., 2017). Sendo assim, os resultados obtidos nesse estudo corroboram com a busca por uma temperatura e concentração ideal de BCLE para o controle de *Mi*.

A carência de conhecimento sobre o assunto é uma questão-chave sobre os fatores químicos, bioquímicos e biológicos responsáveis pela supressão eficaz de doenças baseada no uso de BC's (POVEDA et al., 2021). Diante disso, e buscando elucidar as principais razões que corroboraram para os resultados obtidos para o patossistema FC/*Mi*, verifica-se que, mesmo com a aplicação do BCLE, o nematoide foi capaz de se estabelecer, induzir galhas e reproduzir, levando a um aumento populacional. No entanto, esses resultados também demonstram o potencial para a viabilidade do uso do BC para a supressão desse patógeno. Uma vez que reduzir a população e conseqüentemente o inóculo inicial do nematoide é uma das principais estratégias de controle para esse patógeno no solo (ARITA; DA SILVA; MACHADO, 2020).

Nesse sentido, algumas concentrações dos BC's ao final do ciclo das plantas levaram uma redução significativa do FR, parâmetro muito importante, pois indica uma redução da multiplicação do nematoide na planta. Diante disso, o uso dos diversos BC's mostrou avanços significativos na última década, e demonstraram fortes indícios dos seus benefícios contra doenças em plantas (BONANOMI; IPPOLITO; SCALA, 2015).

Contudo, o BCLE mostrou ser uma nova tecnologia a ser aperfeiçoada, pois demonstrou ser uma ferramenta eficaz nesse primeiro relato do controle de *Mi* em casa de vegetação. Novos estudos devem ser conduzidos em condições de campo e com outras culturas e patógenos para um maior desenvolvimento nesse campo de estudos do controle de doenças parasitárias em plantas com a aplicação de BC's.

5. CONCLUSÕES

A aplicação direta do BCLE ao solo aumentou os teores de macro e micronutrientes no solo e nas plantas, aumentando a produção e reduzindo a população de *Meloidogyne incognita* no sistema radicular de feijão-caupi. O BC300 foi mais eficiente em controlar o *Mi* nas doses de 1,5% a 2,5%, enquanto o BC500 foi mais eficiente em controlar o *Mi* em concentrações mais baixas de 1,0% a 2,0%. Apesar dos efeitos benéficos, o presente estudo demonstra que a dose elevada (3,0%) do biocarvão, em ambas as temperaturas de pirólise (300 °C e 500 °C), pode reduzir a sua eficácia no controle de *Meloidogyne incognita*.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEGNEHU, G.; BASS, A. M.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 295-306, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>

AL-WABEL, M. I.; AL-OMRAN, A.; EL-NAGGAR, A. H.; NADEEM, M.; USMAN, A. R.A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 374-379, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165>

AMONETTE, J. E.; JOSEPH, S. Characteristics of biochar: microchemical properties. In: LEHMANN, J. (Ed.), **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**, Earthscan, London, p. 33–52, 2009.

ARAUJO, A. S.; BLUM, L.E. B.; FIGUEIREDO, C. C. Biochar and *Trichoderma harzianum* for the control of *Macrophomina phaseolina*. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180259>

ARITA, L. Y.; DA SILVA, S. A.; MACHADO, A. C. Z. Efficacy of chemical and biological nematicides in the management of *Meloidogyne paranaensis* in *Coffea arabica*. **Crop Protection**, v. 131, p. 105-099, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105099>

BONANOMI, G.; IPPOLITO, F.; SCALA, F. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. **Journal Plant Pathology**, v. 97, p. 223–34, 2015.

BONANOMI, G.; LORITO, M.; VINALE, F.; WOO, S.L. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: toward a unified framework for disease suppression. **Annual Review Phytopathology**, v. 56, n. 1, p. 1-20, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-100046>

CARNEIRO, R. M. D. G.; ALMEIDA, M. R. A. Técnica de eletroforese usada no estudo de enzimas dos nematoides de galhas para identificação de espécies. **Nematologia Brasileira**, v. 25, p. 35-44, 2001.

DE OLIVEIRA, E.; MATTAR, E. P. L.; DE ARAÚJO, M. L.; DE JESUS, J. C. S.; NAGY, A. C. G.; SANTOS, V. B. Descrição de cultivares locais de feijão-caupi coletados na microrregião Cruzeiro do Sul, Acre, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 3, p. 243–254, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201404553>

DESAEGER, J. A.; WATSON, T. T. Evaluation of new chemical and biological nematicides for managing *Meloidogyne javanica* in tomato production and associated double-crops in Florida. **Pest Management Science**, v. 75, n. 12, p. 3363–3370, 2019. <https://10.1002/ps.5481>

DJIAN-CAPORALINO, C.; MATEILLE, T.; BAILLY-BECHET, M.; MARTEU, N.; FAZARI, A.; PIERRE BAUTHEAC, P.; RAPTOPOULO, A.; DUONG, L. V.;

TAVOILLOT, J.; MARTINY, B.; GOILLON, C.; CASTAGNONE-SERENO, P. Evaluating sorghums as green manure against root-knot nematodes. **Crop Protection**, v. 122, p. 142-150, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.002>

DJIAN-CAPORALINO, C.; NAVARRETE, M.; PALLOIX, A.; MATEILLE, T.; LEFEVRE, A.; BARBARY, A.; FAZARI, A.; MARTEU, N.; CHAPUIS, M.; TCHAMITCHIAN, M.; DUFILS, A. Varietal and technical innovations for the sustainable and integrated management of root-knot nematodes. **Journal of Nematology**, 46, n. 2, p.154, 2014. <https://hal.inrae.fr/hal-02629917>

DIAS, M. A. **Seleção de acessos de feijão-caupi resistentes ao nematoide das galhas (*Meloidogyne* spp.)**. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Programa de Pós-graduação em Fitopatologia, Universidade de Brasília. Brasília, p.59. 2020.

EGAMBERDIEVA, D.; WIRTH, S.; BEHRENDT, U.; ABDALLAH, E. F.; BERG, G. Biochar treatment resulted in a combined effect on soybean growth promotion and a shift in plant growth promoting rhizobacteria. **Frontiers Microbiology**, v. 7, p. 209, 2016. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00209>

ELAD, Y.; DAVID, D. R.; MELLER HAREL, Y. BORENSHTEIN, M.; BEN KALIFA, H.; SILBER, A.; GRABER, E. R. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. **Phytopathology**, v. 100, p. 913–921, 2010. <https://10.1094/PHYTO-100-9-0913>.

ELMER, W. H.; PIGNATELLO, J. J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. **Plant Disease**, v. 95, p. 960-966, 2011. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741>

FACHINI, J.; COSER, T. R.; ARAUJO, A. S. D.; VALE, A. T. D.; JINDO, K.; FIGUEIREDO, C. C. D. One year residual effect of sewage sludge biochar as a soil amendment for maize in a Brazilian oxisol. **Sustainability**, v.13, p. 2226, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13042226>

FAJINMI, A. A. Interactive Effect of *Blackeye cowpea mosaic virus* and *Cucumber mosaic virus* on *Vigna unguiculata*. **Horticultural Plant Journal**, v. 5, n. 2, p. 88–92, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.01.001>

FIGUEIREDO, C. C.; COSER, T. R.; MOREIRA, T. N.; LEÃO, T. P.; VALE, A. T. D.; PAZ-FERREIRO, J. Carbon mineralization in a soil amended with sewage sludge-derived biochar. **Applied Sciences**, v. 9, p. 4481, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9214481>

FRENKEL, O.; JAISWAL, A. K.; ELAD, Y.; LEW, B.; KAMMANN, C.; GRABER, E. R. The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates? **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 25, p. 105-113, 2017. <https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1307202>

GEORGE, C.; KOHLER, J.; RILLIG, M. C. Biochars reduce infection rates of the root-lesion nematode *Pratylenchus penetrans* and associated biomass loss in carrot. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 95, p. 11-18, 2016. <https://10.1016/j.soilbio.2015.12.003>

GHAREEB, R. Y.; SHAMS EL-DIN, N. G. D.; MAGHRABY, D. M. E.; INRAHIM, D. S. S.; ABDEL-MEGEED, A.; ABDELSALAM, N. Nematicidal activity of seaweed-synthesized silver nanoparticles and extracts against *Meloidogyne incognita* on tomato plants. **Scientific Reports**, v. 12, p. 3841, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06600-1>

HADAR, Y.; PAPADOPOULOU, K. K. Suppressive composts: microbial ecology links between abiotic environments and healthy plants. **Annual Review of Phytopathology**, v. 50, n. 1, p. 133–153, 2012.

HAREL, Y. M.; ELAD, Y.; RAV-DAVID, D.; BORENSTEIN, M.; SCHULCHANI, R.; LEW, B.; GRABER, E. R. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. **Plant Soil**, v. 357, p. 245–57, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3>

HUANG, W. K.; JI, H.; GHEYSEN, G.; DEBODE, J.; KYNDT, T. Biochar-amended potting medium reduces the susceptibility of rice to root knot nematode infections. **BMC Plant Biology**, v. 15, p. 267, 2015. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0654-7>

HUSSEY, R. S.; JANSSEN, G. J. W. Root-knot nematodes: *Meloidogyne* species. In: **Plant resistance to parasitic nematodes**. In: STARR, J.L.; BRIDGE, J.; COOK, R. (eds) Plant resistance to parasitic nematodes. CABI Publishing, Wallingford, p. 43–70, 2002. <https://10.1079/9780851994666.0000>

HUSSEY, R. S.; BARKER K. R. A comparison of methods collecting inocula of *Meloidogyne* spp. including a new technique. **Plant Disease Reporter**, v. 57, p. 1025–1028, 1973.

JAISSWAL, A. K.; ELAD, Y.; GRABER, E. R.; FRENKEL, O. *Rhizoctonia solani* suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration, **Soil Biology & Biochemistry**, v. 69, p. 110–118, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.051>

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, p. 1812–36, 2011.

MANOLIKAKI, I.; DIAMADOPOULOS, E. Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, p. 512–526, 2019. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566468>

MANSOURABAD, M. A.; BIDEH, A. K.; ABDOLLAHI, M. Effects of some micronutrients and macronutrients on the root- knot nematode, *Meloidogyne incognita*, in greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* cv. Negin). **Journal Crop Protection**, v. 5, n. 4, p. 507–517, 2016. <https://doi.org/10.18869/modares.jcp.5.4.507>

MEHARI, Z. H.; ELAD, Y.; RAV-DAVID, D.; GRABER, E. R.; HAREL, Y. M. Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Botrytis cinerea* by biochar amendment involves jasmonic acid signaling. **Plant and Soil**, v. 395, p. 31–44, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2445-1>

MELO, F. DE B.; CARDOSO, M. J. Solos e adubação. In: BASTOS, E. A. (Ed.). **Cultivo de feijão-caupi**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Versão eletrônica. (Embrapa Meio-Norte. Sistema de produção, 2; Embrapa Amazônia Ocidental. Sistema de produção, 2; Embrapa Agrobiologia. Sistema de produção, 4).

NDEVE, A. D.; SANTOS, J. R. P.; MATTHEWS, W. C.; HUYNH, B. L.; GUO, Y-N.; LO, S.; MUÑOZ-AMATRIÁIN, M.; ROBERTS, P. A. A novel root-knot nematode resistance QTL on chromosome Vu01 in cowpea. **G3 Genes, Genomes, Genetics**, v. 9, p. 1199–1209, 2019. <https://doi.org/10.1534/g3.118.200881>

NISHANTHA, K.; MARASINGHE, M.; WIJETHUNGA, H. M.; WIJEWARDHANE, K. G.; DISSANAYAKE, M.; NUGALIYADDE, M. M. Soil types and their physiochemical properties for population development of root knot nematode (*Meloidogyne* spp.) in Tomato (*Solanum lycopersicum*). **European Journal of Agriculture and Food Sciences**, v. 2, p. 6, 2020. <https://doi.org/10.24018/ejfood.2020.2.6.180>

NUNES, R. T. C.; SOUZA, U. O.; NETO, A. C. A.; MORAIS, O. M.; FOGAÇA, J. J. N.; SANTOS, J. L.; CARDOSO, A. D.; SÃO JOSÉ, A. R. Produção e qualidade de sementes de feijão-caupi em função de doses de molibdênio e da população de plantas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 533–542, 2017. <https://doi.org/10.19084/RCA17028>

OOSTENBRINK, M. Major characteristics of the relation between nematodes and plants. **Mededelingen Van de landbouwhogeschool te wageningen, Nederland**, v. 66, p.1-46, 1966.

PANDEY, R. K., NAYAK, D. K. Effects on macronutrient contents in susceptible and resistant ridge gourd cultivars against induced population of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. **Indian Phytopathology**, v. 72, p. 125–129, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42360-018-00108-3>

PEREIRA, T. S.; MACÊDO, A. G.; DA SILVA, J.; PINHEIRO, J. B.; DE PAULA, A. M. BISCAIA, D.; BUSATO, J. G. Water-extractable fraction of vermicomposts enriched with *Trichoderma* enhances the growth of bell pepper and tomato as well as their tolerance against *Meloidogyne incognita*, **Scientia Horticulturae**, v. 272, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109536>.

POSTMA, J.; CLEMATIS, F.; NIJHUIS, E. H.; SOMEUS, E. Efficacy of four phosphate-mobilizing bacteria applied with an animal bone charcoal formulation in controlling *Pythium aphanidermatum* and *Fusarium oxysporum* f.sp *radicis lycopersici* in tomato, **Biological Control**, v. 67, p. 284–291, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.07.002>

POVEDA, J., MARTÍNEZ-GÓMEZ, Á., FENOLL, C., E ESCOBAR, C. The use of biochar for plant-pathogen control. **Phytopathology**, v. 111, p. 1490-1499, 2021. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0248-RVW>

RAFIQ, M. K.; BAI, Y.; AZIZ, R.; RAFIQ, M. T.; MAŠEK, O.; BACHMANN, R. T.; JOSEPH, S.; SHAHBAZ, M.; QAYYUM, A.; SHANG, Z.; DANAE, M.; LONG, R. Biochar amendment improves alpine meadows growth and soil health in Tibetan plateau

over a three year period. **Science of the Total Environment**, v. 717, p. 135296, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135296>

ROSTAMI, S.; CHAREHGANI, H.; ABDOLLAHI, M.; REZAEI, R. Evaluation of nano iron and zinc chelated fertilizers on okra *Abelmoschus esculentus* infected with *Meloidogyne javanica*. **Journal Crop Protection**, v. 10, p. 493-502, 2021. URL: <http://jcp.modares.ac.ir/article-3-47643-en.html>

SANTANA-GOMEZ, S. M.; DIAS-ARIEIRA, C. R.; ROLDI, M., DADAZIO, T. S.; MARINI, P. M.; BARIZAO, D. A. O. Mineral nutrition in the control of nematodes. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, p. 2413-2420, 2013. <http://10.5897/AJARx12.008>

SIDDIQUE, S.; GRUNDLER, F. M. Parasitic nematodes manipulate plant development to establish feeding sites. **Current Opinion in Microbiology**, v. 46, p. 102-108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2018.09.004>

SIKORA, R. A.; FRENÁNDEZ, E. Nematode parasites of vegetables. In: LUC. M.; SIKORA, R. A.; BRIDGE, J. (Eds.). **Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture**, 2nd edition. CABI Publishing, Wallingford, UK, p. 319-392, 2005.

SRINIVASARAO, C.; GOPINATH, K.A.; VENKATESH, G.; DUBEY, W. HARSHA, A. K.; PURAKAYASTHA, T. J.; PATHAK, H.; JHA, P.; LAKARIA, B. L.; RAJKHOWA, D. J.; SANDIP, M.; JEYARAMAN, S.; VENKATESWARLU, B.; SIKKA A. K. **Use of Biochar for Soil Health Enhancement and Greenhouse Gas Mitigation in India**. Central Research Institute for Dryland Agriculture, Hyderabad, Andhra Pradesh. p. 1-62, 2013.

TAYLOR, A. L.; SASSER, J. N. **Biology, identification and control of root-knot nematodes (*Meloidogyne* species)**. Raleigh, North Carolina State University, p.111, 1978.

VIAENE, N., COYNE, D. L.; DAVIES, K. G. Biological and cultural management. In: PERRY, R.; MOENS, M. (Eds.), **Plant Nematology** (2nd edition), CAB International, UK, p. 384-410, 2013.

WARNOCK, D. D., LEHMANN, J., KUYPER, T. W., RILLIG, M. C. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms. **Plant Soil**, v. 300, p. 9–20, 2007.

WINDHAM, G. L.; BAKER, K. R. Effects of soil type on the damage potential of *Meloidogyne incognita* on soybean. **Journal of Nematology**, v.18, p.331-338, 1986.

WU, K. Y.; KONG, Z.; LI, C. Z.; LIU, D.; YU, Y.; GAO, X. Removal and recycling of inherent inorganic nutrient species in mallee biomass and derived biochars by water leaching. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, p. 21, 2011. <https://doi.org/10.1021/ie200679n>

XIE, J.; LI, S.; MO, C.; WANG, G.; XIAO, X.; XIAO, Y. A Novel *Meloidogyne incognita* effector Misp12 suppresses plant defense response at latter stages of nematode

parasitism. **Frontier in Plant Science**, v. 30, p. 964, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00964>

ZHANG, R.; OUYANG, J.; XU, X.; LI, J.; REHMAN, M.; DENG, G., SHU, J.; ZHAO, D.; CHEN, S.; SAYYED, R. Z.; FAHAD, S.; CHEN, Y. Nematicidal activity of *Burkholderia arboris* J211 against *Meloidogyne incognita* on tobacco. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.915546>

ZORNOZA, R.; MORENO-BARRIGA, F.; ACOSTA, J. A.; MUNOZ, M. A.; FAZ, A. Stability, nutrient availability, and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. **Chemosphere**, v.144, p.122–130, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.046>

CAPÍTULO 4

**EFEITO DA INCUBAÇÃO DO BIOCARVÃO DE LODO DE
ESGOTO NO PERÍODO DE SEIS MESES E UM ANO CONTROLE
DE *Meloidogine incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI**

EFEITO DA INCUBAÇÃO DO BIOCÁRVÃO DE LODO DE ESGOTO POR SEIS MESES E UM ANO NO CONTROLE DE *Meloidogyne incognita* EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI

RESUMO

Os nematoides, principalmente *Meloidogyne incognita-Mi*, causam danos significativos às plantas de feijão-caupi. Nesse contexto o uso de biocárvão de lodo de esgoto (BCLE) pode representar uma alternativa de controle sustentável para esse patógeno. O objetivo deste estudo foi de avaliar a aplicação desse material ao solo preparado a 300 °C (BC300) e 500 °C (BC500) em diferentes concentrações variando de 0,0 a 2,0%, após a incubação por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA. Dessa forma, o BC300 nas concentrações aplicadas reduziu a população (ovos e J₂) em 61% aos 180 dias após a incubação, e após os 360 DAA, a redução média foi de mais de 80%. O BC500 reduziu em média 64% aos 180 DAA e aos 360 DAA a redução com a concentração de 1,0% foi de 97%. Demonstrando, que a incubação desse material ao solo no período avaliado manteve a sua atuação no controle do nematoide. Portanto, a viabilidade da aplicação das diferentes concentrações de BCLE nas duas temperaturas se manteve contra o nematoide, à medida que esse material ainda é uma fonte renovável de nutrientes para as plantas com um enorme potencial para mitigar as mudanças climáticas no planeta.

Palavra-chave: Controle alternativo, patógeno vegetal, agricultura sustentável,

EFFECT OF INCUBATION OF BIOCHAR FROM SEWAGE SLUDGE IN SIX MONTHS AND ONE YEAR ON THE CONTROL OF *Meloidogyne incognita* IN COWPEA PLANTS

ABSTRACT

Nematodes, mainly *Meloidogyne incognita*-*Mi*, cause significant damage to cowpea plants. In this context, the use of sewage sludge biochar (SSBC) may represent a sustainable control alternative for this pathogen. The objective of this study was to evaluate the application of this material to soil prepared at 300 °C (BC300) and 500 °C (BC500) at different concentrations ranging from 0.0 to 2.0%, after incubation for 180 and 360 days after application-DAA. Thus, BC300 in the applied concentrations reduced the population (eggs and J₂) by 61% at 180 days after incubation, and after 360 DAA, the average reduction was more than 80%. BC500 reduced an average of 64% at 180 DAA and at 360 DAA the reduction with the 1.0% concentration was 97%. Demonstrating that the incubation of this material in the soil in the evaluated period maintained its performance in the control of the nematode. Therefore, the feasibility of applying the different concentrations of SSBC at the two temperatures was maintained against the nematode, as this material is still a renewable source of nutrients for plants with enormous potential to mitigate climate change on the planet.

Keywords: Alternative control, plant pathogen, sustainable agriculture,

1. INTRODUÇÃO

Nematoides fitoparasitas podem causar perdas médias de rendimento nas lavouras de cerca de 12,3% (SINGH et al., 2015). Os prejuízos econômicos associados a esses nematoides globalmente, totalizam em média, um montante de US\$ 173 bilhões anualmente (ELLING, 2013). Dentre eles, os nematoides pertencentes ao gênero *Meloidogyne* são os mais difundidos e economicamente importantes (AZEEM et al. 2020). Em feijão-caupi o nematoide das galhas *Meloidogyne incognita* é um dos maiores problemas da cultura, causando perdas significativas (VILLETH et al., 2015).

Os principais métodos de controle para reduzir a população do nematoide das galhas é baseada em nematicidas químicos ou resistência de plantas (HALLMANN; KIEWNICK, 2018). A maioria, senão totalidade dos compostos químicos usados em seu controle, atualmente são prejudiciais à micro e macrobiota do solo, e em muitos casos até mesmo para saúde humana (JONES et al., 2017). Nesse sentido, BC's através de diversos mecanismos de ação, representam uma estratégia sustentável para controle e supressão de nematoides em várias culturas agrícolas (POVEDA et al., 2021). Apesar das mudanças em relação à matéria-prima e a concentração dos BC's, resultados promissores têm demonstrado a eficiência da aplicação de BC obtido de diversos materiais para a supressão de fitopatógenos habitantes do solo (BONANOMI et al., 2022).

Dentre os principais mecanismos de ação dos BC's na supressão de nematoides fitoparasitas habitantes do solo, estão as mudanças na diversidade de populações de microrganismos antagonistas a esses patógenos (ZHANG et al., 2013; BONANOMI et al., 2022). O aumento populacional de nematoides antagonistas e organismos predadores naturais de espécies de fitonematoides, tem se mostrado uma alternativa para o controle de nematoides do gênero *Meloidogyne* (RAHMAN et al., 2014). A indução do aumento das defesas naturais das plantas (indução da transcrição de genes ligados à biossíntese do etileno), acumulação H_2O_2 nos tecidos da hospedeira, além da toxicidade direta de alguns compostos nematicidas presentes nos BC's, são alguns exemplos das possíveis atuações desse material sobre o patossistema planta/nematoides fitoparasita (HUANG et al., 2015; GEORGE; KOHLER; RILLIG, 2016).

Uma concentração ideal de BC para o controle de patógenos vegetais ainda não foi estabelecida, pois isso pode variar entre os tipos de BC's, tipos de solo e espécies-alvo (GRABER et al., 2014). No entanto, até o momento se sabe que taxas de aplicação entre 0,5 e 135 ton/ha produziram respostas positivas de crescimento das plantas (GLASER;

LEHMANN; ZECH, 2002). E que concentrações que variaram de 0,5 a 60 ton/ha reduziram as doenças em plantas (POVEDA et al., 2021). Dependendo das características intrínsecas de cada tipo de BC, sua aplicação tem o potencial de alterar uma ampla variedade de propriedades do solo, como pH, capacidade de retenção de água, disponibilidade de nutrientes, densidade e agregação do solo (LEHMANN et al., 2015). Porém, os resultados referentes ao BC contra patógenos de plantas, revelam que enquanto baixas concentrações (~1%) suprimem várias doenças, concentrações mais altas (> 3%) resultam em uma curva dose-resposta negativa ou ineficaz (FRENKEL et al. 2017).

A matéria-prima, a granulometria, o teor de C disponível, área de superfície, distribuição do tamanho dos poros, pH, teor de cinzas, bem como as condições de produção (tempo de residência) podem influenciar no resultado da aplicação dos BC's (LENG et al., 2018). Portanto, existem diversos fatores que podem influenciar no desempenho do BC, dentre eles também está a temperatura de pirólise. Que no caso do BCLE, as altas temperaturas são fundamentais para esterilizar o material rico em organismos nocivos a humanos e ao meio ambiente. As altas temperaturas de pirólise, acima de 300°C, influenciam a distribuição dos tamanhos dos poros, grupos funcionais, composição elementar e o valor de pH (FU et al., 2012). BC's obtidos através de altas temperaturas aumentam o efeito a médio e longo prazo dos BC (YUAN et al., 2015). Porém o período de incubação, modifica ou otimiza a ação do BC, bem como sua estabilidade conforme o ambiente ao qual ele é aplicado (LENG; HUANG, 2018).

A ação BC sobre patógenos e plantas hospedeiras podem sofrer variações a médio e longo prazo, porém poucos estudos avaliam a incubação e o efeito residual dos BC's nos diferentes patossistemas. Por exemplo, em alguns estudos, concentrações de 2 a 6 ton/ha⁻¹ de BC de casca de arroz aplicadas com fertilizante mineral deram um efeito residual, com aumento no rendimento da pastagem, com duração de pelo menos três anos, os autores associam o resultado em função de maior atividade e diversidade microbiana no solo (RAFIQ et al., 2020). Houve também aumento da produtividade e qualidade dos frutos, maior tolerância a oídio e ácaro ao longo de três safras, na cultura da pimenta após a aplicação e incubação de BC lenhoso e resíduos verdes (KUMAR, ELAD, et al., 2018).

Joseph et al. (2021) classificaram em três etapas o período de influência dos BC's no solo e a sua interação com as plantas. Etapa 1: reações de curto prazo (1 a 3 semanas) do BC no solo e efeitos na germinação de sementes e plântulas, etapa 2: reação de médio prazo (1 a 6 meses) efeitos no crescimento das plantas e aumento no rendimento da colheita, etapa 3: interações de longo prazo (> 6 meses) que avalia o efeito residual do

BC no solo e seus efeitos nos ciclos de cultivo subsequentes. Portanto, analisando exclusivamente o efeito residual de fertilizante dos BC's sobre as plantas, o crescimento das culturas em solos de Terra Preta, onde ocorreu as primeiras evidências sobre a atuação do BC, é aproximadamente o dobro daquele em solos adjacentes não modificados, fornecendo evidências de que o efeito do BC é duradouro e benéfico ao longo dos anos (LEHMANN et al., 2003).

Dessa forma, estes indícios na estabilidade do efeito desse material nas Terras Pretas de Índio, que deram origem a descoberta do efeito dos BC's na agricultura, demonstram naturalmente como um período de incubação e o seu efeito residual longo são estáveis e benéficos as plantas. Porém em relação a sua utilização no controle de doenças em plantas esses fatores não foram esclarecidos ou até mesmo explorados. Dentro deste contexto, este estudo visou avaliar o efeito da incubação e das interações de médio a longo prazo do BCLE em duas temperaturas de pirólise, quando aplicado em Latossolo Vermelho, de forma a avaliar o efeito da incubação dos BC's na redução da população de *Meloidogyne incognita*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais

Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação na Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília/EEB-UnB, localizada em Brasília/DF. Durante um período de abril de 2020 a fevereiro de 2021 para o ensaio semeado aos 180 dias após a aplicação-DAA e de outubro de 2020 a fevereiro de 2022 para o ensaio semeado com 360 DAA. Na (Figura 1) são apresentados os valores da temperatura no período de condução experimental com média de 23 °C, sendo 33 °C (máxima) e 15 °C (mínima).

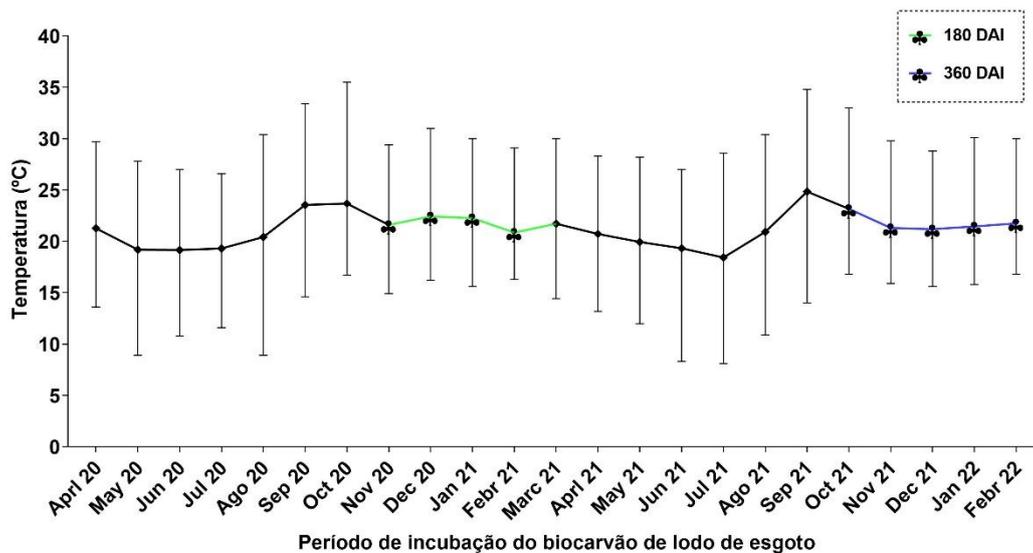


Figura 1. Período de incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise 300 °C; 500 °C) em casa de vegetação, com destaque para período de cultivo do feijão-caupi nos ensaios aos 180 e 360 dias após a aplicação-DAA.

2.2. Local coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão

Conforme descrito no CAP.III.

2.3. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos

Conforme descrito no CAP.III.

2.4. Características físico-químicas do lodo de esgoto, do biocarvão de lodo de esgoto e do solo utilizados nos ensaios

As características do LE, do BC300, BC500 e do Latossolo natural e após a correção e adubação, com a aplicação de calcário dolomítico, adubação mineral com NPK na formulação (10-10-10) em semeadura e cobertura, de acordo com a recomendação de Melo; Cardoso (2017) utilizados nos ensaios são apresentados na (Tabela 1). Os BC's foram misturados ao solo nas proporções de cada tratamento nos vasos que receberam as concentrações nas diferentes temperaturas, conforme descrito no CAP.III.

Tabela 1- Propriedades físico-químicas do Latossolo Vermelho, lodo de esgoto e dos biocarvões de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300°C; 500°C) utilizados nos ensaios com a incubação.

	Latossolo Natural	Latossolo Corrigido	Lodo de esgoto	BCLE 300 °C	BCLE 500 °C
Umidade (%)	nd ^a	nd	10,62 ± 1,56	4,26 ± 0,23	3,17 ± 0,05
Sólidos Voláteis (%)	nd	nd	48,25 ± 1,36	41,75 ± 2,47	29,74 ± 1,40
Cinzas (%)	nd	nd	39,33 ± 2,38	48,27 ± 1,08	60,05 ± 0,51
Carbono Fixo (%)	nd	nd	1,79 ± 0,52	5,72 ± 1,55	7,04 ± 0,86
Carbono Inerte (%)	nd	nd	3,23 ± 0,39	2,86 ± 0,34	3,18 ± 0,08
Carbono Total (%)	nd	nd	18,58 ± 0,26	19,92 ± 0,28	18,65 ± 0,18
COT (%)	nd	nd	17,45 ± 0,85	18,61 ± 0,09	16,90 ± 0,85
MOT (g kg⁻¹)	15,19 ± 0,69	15,63 ± 0,35	30,09 ± 1,47	32,09 ± 0,15	29,13 ± 1,47
Ácido Fúlvico (g kg⁻¹)	nd	nd	24,10 ± 0,58	23,89 ± 0,33	15,12 ± 0,50
Ácido Húmico (g kg⁻¹)	nd	nd	8,45 ± 0,39	7,51 ± 0,11	2,92 ± 0,05
Huminas (g kg⁻¹)	nd	nd	146,28 ± 3,00	139,90 ± 1,21	143,49 ± 2,85
Nitrogênio (%)	nd	nd	3,99 ± 0,05	5,05 ± 1,16	5,03 ± 0,88
C/N	nd	nd	4,66 ± 0,02	3,95 ± 0,96	3,71 ± 0,77
pH (CaCl₂)	4,49 ± 0,03	5,62 ± 0,07	5,48 ± 0,02	6,04 ± 0,04	6,50 ± 0,01
CTC (mmol/dm³)	25,61 ± 2,77	46,93 ± 6,81	286,67 ± 1,53	265,00 ± 2,00	224,67 ± 1,53
Fósforo (mg/dm³)	9,96 ± 2,28	108,58 ± 4,94	22,81 ± 1,84	30,94 ± 1,97	33,74 ± 2,12
Potássio (mmol/dm³)	0,34 ± 0,04	0,72 ± 0,01	nd	nd	nd
Cálcio (mmol/dm³)	4,04 ± 0,28	25,86 ± 4,46	13,17 ± 0,21	11,33 ± 0,15	19,47 ± 0,47
Magnésio (mmol/dm³)	2,15 ± 0,12	11,23 ± 0,52	2,53 ± 0,06	2,77 ± 0,06	3,13 ± 0,06
Enxofre (mg/dm³)	14,34 ± 1,71	235,54 ± 21,93	13,70 ± 0	15,10 ± 0	23,13 ± 0,46
Boro (mg/dm³)	0,13 ± 0,04	0,15 ± 0,02	nd	nd	nd
Cobre (mg/dm³)	0,08 ± 0,02	0,093 ± 0,01	100,00 ± 0	113,33 ± 5,77	130,00 ± 10,00
Ferro (mg/dm³)	7,21 ± 0,38	5,31 ± 0,18	15,40 ± 0,17	16,40 ± 0,10	16,93 ± 0,06
Manganês (mg/dm³)	0,29 ± 0,03	0,74 ± 0,03	100 ± 0	100 ± 0	103,33 ± 5,77
Zinco (mg/dm³)	0,11 ± 0,01	0,11 ± 0,01	400,00 ± 0	503,33 ± 5,77	433,33 ± 57,74
Rendimento (%)	nd	nd	nd	82,48 ± 1,10	64,32 ± 0,60

^aCOT: Carbono orgânico total, MOT: matéria orgânica total, C/N: relação carbono nitrogênio, pH: potencial hidrogeniônico, CTC: capacidade de troca catiônica, rendimento (%): quantidade de lodo de esgoto necessário para a produção de biocarvão, nd: não determinado.

2.5. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo

Conforme descrito no CAP.III.

2.6. Incubação do biocarvão de lodo de esgoto no solo

O solo foi armazenado em vasos e irrigado até aproximadamente 70% da capacidade de campo a cada sete dias para que houvesse a umidade necessária para a ocorrência das reações químicas e físicas do solo e para simular o período chuvoso de ocorrência natural na região do Cerrado. O período de incubação ocorreu de abril a outubro de 2020 até a semeadura do primeiro ensaio aos 180 DAA. E para o segundo ensaio de outubro de 2020 a outubro de 2021. No segundo ensaio a irrigação foi suspensa no mês de junho de 2021, simulando o período de seca, que ocorre naturalmente no bioma Cerrado, retornando com a irrigação 15 dias antes da semeadura do segundo ensaio que ocorreu em outubro aos 360 DAA. A temperatura na casa de vegetação no período de incubação foi de 37 °C (máxima) e de 06 °C (mínima) (Figura 1).

2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento

Conforme descrito no CAP.III.

2.8. Origem e manutenção do inóculo de *Meloidogyne incognita*

Conforme descrito no CAP.III.

2.9. Extração de ovos e J₂ a partir de plantas de feijão-caupi

Conforme descrito no CAP.III.

2.10. Inoculação das plantas de feijão-caupi cultivadas em vasos contendo biocarvão

Conforme descrito no CAP.III.

2.11. Avaliação dos parâmetros relativos à infecção de *Meloidogyne incognita*

Conforme descrito no CAP.III.

2.12. Delineamento e análises estatísticas utilizadas na avaliação do experimento

Conforme descrito no CAP.III.

3. RESULTADOS

3.1. População de *Meloidogyne incognita* no sistema radicular

A população final de nematoides no sistema radicular-PFNR medido pelo (número de ovos e J₂ de *Mi*) foi reduzido significativamente aos 180 e 360 DAA com a aplicação do BCLE em ambas as temperaturas (Figura 2). As concentrações entre 0,5% e 2,0% de BC300 aos 180 DAA, tiveram um nível médio de redução na população de nematoides no sistema radicular das plantas em 61%, com destaque para a menor concentração aplicada que reduziu em 78% a população do nematoide em relação a testemunha.

Após os 360 DAA todas as concentrações de BC300 apresentaram reduções no número de ovos e J₂ em relação ao período anterior com valor médio de 84%, com destaque para as concentrações de 0,5% e 1,5% que reduziram 91,5% e 90% a PFNR respectivamente em relação a testemunha.

Para o BC500 a reduções média na PFNR após 180 DAA com a aplicação das concentrações entre 0,5% e 2,0% foi de 64%, com destaque para as concentrações de 1,5 e 2,0% que apresentaram as maiores reduções com 69,5% e 70% respectivamente. Após o maior período de incubação o BC500 as concentrações entre 0,5% e 2,0% reduziram significativamente o número de nematoides, com valor médio de 88%. Com destaque para a concentração de 1,0% que reduziu em 97% a PFNR em relação a testemunha.

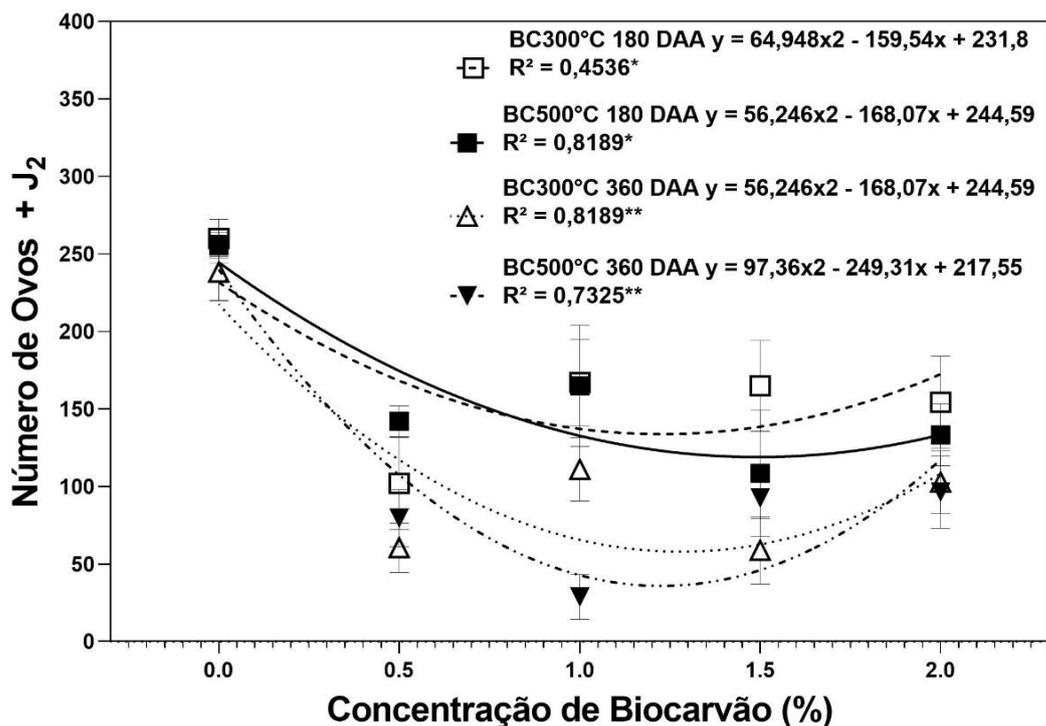


Figura 2. População final de nematoides (ovos + J₂) no sistema radicular (PFNR) de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos de Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) incubado por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA. Coeficiente da equação de regressão R² seguido por * foi significativa a (p≤0,05) e ** (p ≤ 0,01). As barras indicam o erro padrão das médias. Os dados foram transformados em $\sqrt{x+0,5}$

3.2. Número de ovos e juvenis de segundo estágio por grama de raiz

No parâmetro número de ovos e J₂ por grama de raiz, não houve diferenças entre as temperaturas de pirólise e em ambos os períodos avaliados (Figura 3). Para o BC300 aos 180 DAA o maior número foi obtido com o tratamento testemunha 0,0% (119.812) sem a aplicação do BC e o menor valor (11.756) foi obtido na concentração de 0,5%. Aos 360 DAA as diferenças foram mantidas, mas com redução nos valores de (42.654) para a testemunha. E os menores valores (2.073 e 5.641) foram obtidos entre as concentrações 0,5% e 1,5%, contudo todas as concentrações de BC nesse período reduziram a quantidade de ovos e J₂ (Figura 3).

Para o BC500 aos 180 DAA os maiores números obtidos para a testemunha (63.604). E os menores (21.641 e 11.257) foram nas concentrações 1,0 e 1,5%. Aos 360 DAA o menor número (1.787) foi na concentração 1,0%. E o maior valor (38.779) foi na testemunha (Figura 3).

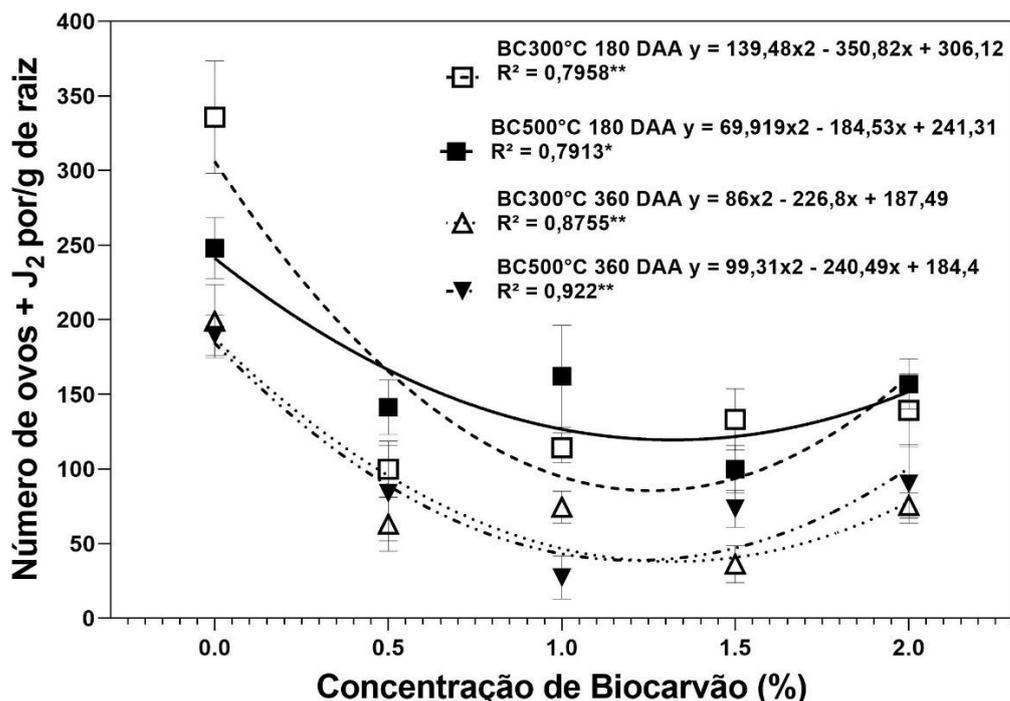


Figura 3. Número de nematoides (ovos e J₂) por grama de sistema radicular (NNGR) de plantas de feijão-caupi cultivadas em casa de vegetação em vasos de Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) incubado por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA. Coeficiente da equação de regressão R² seguido por * foi significativa a (p ≤ 0,05) e ** (p ≤ 0,01). As barras indicam o erro padrão das médias. Os dados foram transformados em $\sqrt{x+0,5}$.

3.3. Reprodução de *Meloidogyne incognita*

Os valores do fator de reprodução do *Mi* foram menores em todas as concentrações que receberam a aplicação do BC, independente da temperatura, em ambos os períodos avaliados. Todos as concentrações do BC300 em ambos os períodos foram diferentes da testemunha, o menor valor (2,6) aos 180 DAA e (1,0) aos 360 DAA foi obtido com BC300 0,5%. A concentração do BC300 a 1,5%, apresentou redução com relação ao período do ensaio anterior (Figura 4).

Todos as concentrações de BC500 foram capazes de reduzir o FR do *Mi*, porém o BC500 1,0% aos 360 DAA apresentou o menor índice para esse parâmetro com valor de (0,38), menor valor entre todas as concentrações nos diferentes períodos.

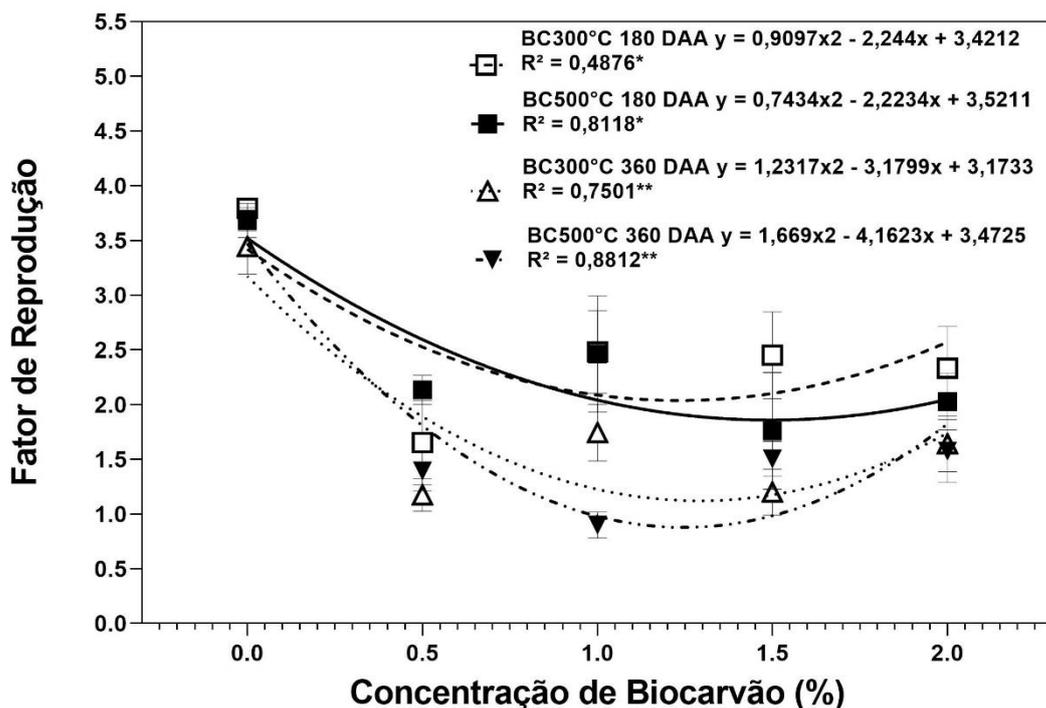


Figura 4. Variações no fator de reprodução de *Meloidogyne incognita* inoculado em plantas de feijão-caupi, cultivadas em casa de vegetação, com a adição de diferentes concentrações de biocarvão de lodo de esgoto (Pirólise: 300 °C; 500 °C) incubado por 180 e 360 dias após a aplicação-DAA. Coeficiente da equação de regressão R² seguido por * foi significativa a (p ≤ 0,05) e ** (p ≤ 0,01). As barras indicam o erro padrão das médias. Os dados foram transformados em $\sqrt{x+0,5}$.

Contudo, na (Figura 5) são apresentadas imagens demonstrativas dos sistemas radiculares das plantas de feijão-caupi em cada concentração avaliada, em comparação a um controle, sem a aplicação de BC ao final do último período de avaliação da incubação aos 360-DAA do BCLE e aos 90-DAI do *Mi*. Verifica-se visualmente que houve um número reduzido de galhas nas raízes após o maior período de incubação avaliado.

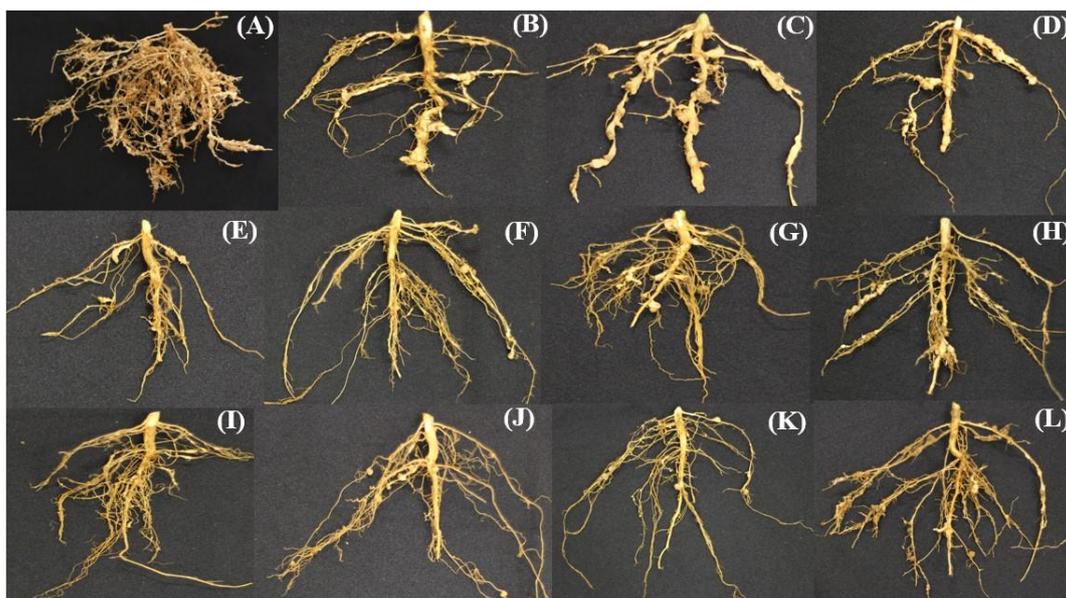


Figura 5. Sistemas radiculares de plantas de feijão-caupi 90 dias após a inoculação-DAI de *Meloidogyne incognita* em plantas cultivadas em casa de vegetação em vasos com Latossolo Vermelho esterilizado com a adição de diferentes concentrações (0,0%, 1,0%, 1,5% e 2,0%) de biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) com incubação de 360 dias após a aplicação-DAA. (A) BC300-0,0%, (B) BC300-0,0%, (C) BC500-0,0%, (D) BC500-0,0%, (E) BC300-0,5%, (F) BC300-1,0%, (G) BC300-1,5%, (H) BC300-2,0%, (I) BC500-0,5%, (J) BC500-1,0%, (K) BC500-1,5%, (L) BC500-2,0%.

4.DISCUSSÃO

A incubação do BCLE nos períodos avaliados, mostrou-se eficiente em promover alterações no controle do nematoide nas condições avaliadas. Todos os tratamentos que receberam a aplicação do BCLE nas diferentes temperaturas, foram capazes de reduzir a população de *Meloidogyne incognita-Mi* nas raízes de feijão-caupi independente do período de incubação. O efeito da aplicação direta (CAP. III), sem que houvesse a incubação do BCLE demonstrou reduções expressivas na população e no fator de reprodução do nematoide. Os ensaios com a incubação demonstraram que essa redução não só é mantida, como é aumentada ao longo do prazo de 180 e 360 DAA.

Reduções provenientes de uma aplicação direta, sem período de incubação mostram indícios de uma ação imediata do BCLE sobre o solo e o patógeno, estando aliada a uma provável indução de resistência na planta, que reduz os danos do patógeno na hospedeira. Entretanto, a incubação ou “envelhecimento” do BC no solo, favorece interações entre os minerais e microrganismos, levando a formação de micro aglomerados organominerais que podem aumentar a capacidade de retenção de nutrientes, favorecendo o balanceamento nutricional (LUSTOSA FILHO et al., 2020).

Todavia, esse balanceamento é fundamental na manutenção da sanidade das plantas, em contrapartida o desbalanço pode favorecer a entrada e atuação do patógenos em diversos patossistemas (JAISWAL et al., 2019). A matéria orgânica presente no BCLE, introduzida com a aplicação desse material é um componente fundamental na manutenção da fertilidade em solos tropicais (FIGUEIREDO et al., 2019). Pois proporciona a interação entre as frações minerais e de microrganismos, fundamentais para a manutenção ecológica dos agroecossistemas (SHETTY; PRAKASH, 2020). Portanto a formação de micro aglomerados em porções de matriz de C que se desprendem formando partículas coloidais, migrando ao longo do tempo através das camadas mais superficiais do solo auxiliam na estabilidade mineral e biológica do solo (LENG et al., 2019).

O efeito da incubação por meio da agregação das partículas, pode proteger o BC e a matéria orgânica recém-adicionada, estabilizando o novo C por longos períodos no solo (JOSEPH et al, 2020). Mesmo com uma única aplicação, podem ocorrer alterações físicas e químicas, que influenciam na dinâmica nutricional da planta e a sua interação com microrganismos habitantes do solo, patogênicos ou não, como é o caso do pH (JOSEPH et al., 2021). Há uma grande quantidade de literatura examinando reações de BC's ao longo de vários anos, geralmente com base em uma única aplicação em altas taxas (por exemplo, 20-30 ton/ha ou 2-3% p/p) e na maioria desses casos, os ensaios foram conduzidos em vasos (BURRELL et al., 2016). Dentre esses estudos poucos consideraram os efeitos potenciais da incubação após a aplicação, e o efeito residual a longo prazo do BC em doenças de plantas (GRABER et al., 2014).

No caso do BCLE neste estudo, que aumentou seu efeito supressor com o aumento do período de incubação, há indícios de uma possível atuação de diversos mecanismos de ação sobre o *Mi*. Apesar que, inicialmente o solo tenha sido autoclavado, os períodos de incubação na presença de umidade podem ter induzido um aumento populacional de microrganismos presentes endofiticamente nas sementes de FC, ou mesmo no ar e na água de irrigação. Esses organismos podem ter contribuído para a redução da infecção do *Mi* na planta e na infestação do solo após os 180 DAA se intensificando aos 360 DAA. Com essa contribuição biológica, aliada a ação de outros mecanismos relacionados a aplicação do BCLE, podem ser deduzidos os seguintes cenários, que expliquem os resultados de sua aplicação sobre o patossistema *Mi*/FC após a incubação no solo: Cenário I: Houve atuação direta de compostos presentes no BCLE sobre o nematoide, que foram liberados no solo ao longo da incubação, diminuindo sua capacidade de infectividade na planta e sobrevivência no solo; Cenário II: Atuou modificando a estrutura físico-química

do solo, alterando o pH, a disponibilidade de água e nutrientes para a planta, a porosidade do solo induzindo a expansão radicular dificultando a sobrevivência e a infectividade do nematoide nas raízes; Cenário III: Proporcionou o aumento de microrganismos antagonistas do nematoide no solo, ao longo da incubação, que competem ou que são predadores ou parasitas do nematoide dificultando a sua sobrevivência; Cenário IV: Induziu uma resistência sistêmica nas plantas de FC, que são capazes de se tornar resistentes ao nematoide, diminuindo a sua infecção e conseqüente sua reprodução, reduzindo a sua população a cada ciclo do patógeno;

O cenário I é difícil de ser provado nas condições experimentais específicas desse estudo, porém não deve ser descartado. O BC produzido de matérias primas bastante heterogêneas como o LE possuem vários compostos provenientes de muitas fontes diferentes, que individualmente ou em conjunto podem suprimir ou estimular microrganismos do solo (SUN et al., 2015; ARAUJO et al., 2021). Os primeiros estudos que caracterizaram compostos com atuação tóxica sobre o crescimento e sobrevivência de microrganismos, destacaram principalmente: etilenoglicol e propilenoglicol, ácidos hidroxipropiônico e hidroxibutírico, ácido benzóico e o-cresol, quinonas (resorcinol e hidroquinona) e 2-fenoxietanol (GRABER et al., 2010, BUSS et al., 2015).

No caso do cenário II, são levados em consideração as modificações físico-químicas do solo, que podem reduzir a capacidade de sobrevivência do patógeno tornando o solo supressivo a *Mi*. Características como a mudança do pH, disponibilidade de nutrientes, melhora no balanço hídrico da planta, são fatores que podem ser alterados com a aplicação de BC, que influenciam no controle de fitopatógenos no solo (ELAD et al., 2011; ELMER; PIGNATELLO, 2011; JAISWAL et al., 2014; COPLEY et al., 2015; JAISWAL et al., 2015, BONANOMI, IPPOLITO; SCALA, 2015).

Levando em consideração o cenário III, autores que investigam nessa linha de estudo, associam os benefícios do BC em função de maior atividade e diversidade microbiana no solo. Por exemplo, em alguns estudos, concentrações de 2 a 6 ton/ha de BC de casca de arroz aplicadas com fertilizante mineral aumentaram o rendimento da pastagem, com duração de pelo menos três anos (RAFIQ et al., 2020). Acredita-se que o BC possa estimular a atividade microbiana devido à presença de poros como micro habitats e por mudanças em fatores abióticos que podem dar uma vantagem competitiva a algumas populações sobre outras (por exemplo, modulando o pH ou alterando a presença e disponibilidade de substâncias tóxicas). Além de ser usado como fonte de

energia ou nutrientes minerais pelos microrganismos habitantes do solo (THIES; RILLIG; GRABER, 2015).

Nesse sentido, um estudo ao longo de três safras na cultura da pimenta após a aplicação de BC lenhoso e resíduos verdes, aumentou a produtividade e qualidade dos frutos, levando a uma maior tolerância a oídio e ácaro (KUMAR, ELAD, et al., 2018). Esse estudo é um dos poucos exemplos de uma avaliação do efeito a longo prazo da aplicação de um BC. Porém, em culturas perenes esse efeito pode ser medido de maneira eficiente, pela presença constante da cultura em campo. Em videira, o uso de BC de cama de frango reduziu significativamente as populações de nematoides fitoparasitas no solo, como *Meloidogyne javanica*, *Tylenchulus semipenetrans* Cobb, 1913, *Pratylenchus* spp., *Helicotylenchus* spp., e *Criconeмоide* spp., enquanto houve um aumento populacional de organismos benéficos para a cultura (RAHMAN et al., 2014).

Mudanças na diversidade populacional, mesmo que só na nematológica, podem ser efetivas contra nematoides fitoparasitas no solo. Nesse sentido, a aplicação de BC de palha de trigo influenciou o aumento da diversidade de nematoides no solo, aumentando a abundância de nematoides micófitos de vida livre e diminuindo a população de nematoides fitoparasitas dos gêneros *Coslenchus*, *Hirschmanniella*, *Rotylenchus* e *Tylenchus* (ZHANG et al., 2013).

Levando em consideração o cenário IV, a indução de defesas nas plantas constituiu outro mecanismo eficaz contra *Pratylenchus* spp. A aplicação de BC de madeira de coníferas e casca de espelta na concentração de 5% (v/v) aumentou a resistência contra *Pratylenchus penetrans* Goodey, 1951 em plantas de cenoura. No entanto, segundo os autores, nesse estudo a toxicidade direta ou alteração do pH do solo não pode ser descartada como um mecanismo de ação (GEORGE; KOHLER; RILLIG, 2016). Na cultura da banana o BC de toras de madeira na concentração de 4% (p/p) foi eficaz na redução da população de um dos principais fitonematoides endoparasita migratório da bananicultura, o *Pratylenchus coffeae*, causador de perdas significativas em pomares dessa fruta (RAHAYU; SARI, 2017).

Além disso, outro nematoide endoparasita formador de galhas, do mesmo gênero do nematoide utilizado neste estudo, *M. graminicola*, um dos principais nematoides fitoparasitas na cultura do arroz, foi controlado pela adição de BC de madeira de carvalho na concentração de 1,2% (v/v). Esse efeito foi associado a um acúmulo local de H₂O₂ e a um aprimoramento transcricional de genes relacionados à biossíntese do etileno, que influenciaram a ativação dos genes de defesa da planta (HUANG et al., 2015). Dessa

forma todos os estudos até o momento envolvendo a aplicação de BC para o controle de nematoides e outros fitopatógenos, indicam diferentes mecanismos de ação e uma série de outros fatores ainda desconhecidos ou não totalmente elucidados, principalmente aqueles relacionados ao efeito residual por longos períodos.

Contudo, estudos futuros devem ser conduzidos a fim de elucidar melhor o papel do BCLE no controle de doenças em plantas. Novas tecnologias como essa, devem ser avaliadas em condições de campo, para responder a algumas das muitas perguntas sobre mecanismos de ação do BC sobre os ambientes naturais. A importância de novos estudos com a utilização de resíduos como o LE na agricultura é uma necessidade cada vez mais presente na busca pela sustentabilidade agrícola. O controle de patógenos de solo como *Mi*, com a transformação de um material potencialmente poluidor como o LE, em um insumo agrícola de qualidade trazem benefícios econômicos, ambientais, sociais e sanitários para produtores rurais e consumidores.

5. CONCLUSÕES

A incubação do BCLE por 180 e 360 dias foi eficiente na redução populacional do *Mi* em plantas de FC. Concentrações entre 0,5% e 1,5% foram mais eficazes na redução populacional do patógeno. A concentração de 1,0% de BC300 e BC500 se destacou em ambas as temperaturas de pirólise no controle do patógeno. O BCLE mostrou-se uma alternativa viável e sustentável no controle de *Mi*.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A. S.; BLUM, L. E. B.; ANDRADE, D. V. N.; SILVA JUNIOR, P. B.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage Sludge Biochar Effects on Phytopathogenic Fungi and Beneficial Microorganisms. **Brazilian Archives of Biology and Technology** [online], v. 64, e21210266, 2021. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021210266>

AZEEM, W.; MUKHTAR, T.; HAMID, T. Evaluation of *Trichoderma harzianum* and *Azadirachta indica* in the management of *Meloidogyne incognita* in tomato. **Pakistan Journal of Zoology**, v. 1, p. 52, 2020. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2020.52>

BONANOMI, G.; ZOTTI, M.; IDBELLA, M.; CESARANO, G.; AL-ROWAILY, S. L.; ABD-ELGAWAD, A. M. Mixtures of organic amendments and biochar promote beneficial soil microbiota and affect *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*, *Rhizoctonia solani* and *Sclerotinia* minor disease suppression. **Plant Pathology**, v. 71, p. 818– 829, 2022. <https://doi.org/10.1111/ppa.13514>

BONANOMI, G.; IPPOLITO, F.; SCALA, F. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases, **Journal of Plant Pathology**, v. 97, p. 223– 234, 2015.

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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.01>

BUSS, W.; MAŠEK, O.; GRAHAM, M.; WÜST, D. Inherent organic compounds in biochar – Their content, composition and potential toxic effects. **Journal Environment Management**, v. 7, p. 156 - 150, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.0-3.035>

BUSS, W.; BOGUSH, A.; IGNATYEV, K.; MASEK, O. Unlocking the fertilizer potential of waste-derived biochar. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, p. 12295–12303, 2020. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c0433>

BUSS, W.; ASSAVAVITTAYANON, K.; SHEPHERD, J. G.; HEAL, K. V.; SOHI, S. Biochar phosphorus release is limited by high pH and excess calcium. **Journal of Environmental Quality**, v. 47, n. 5, p. 1298–1303, 2018. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.05.0181>

COPLEY, T. R.; ALIFERIS, K. A.; AND JABAJI, S. Maple bark biochar affects *Rhizoctonia solani* metabolism and increases damping-off severity. **Phytopathology**, v. 105, p. 1334-1346, 2015.

ELAD, Y.; CYTRYN, E.; MELLER HAREL, Y.; LEW, B.; GRABER, E. R. The biochar effect: plant resistance to biotic stresses, **Phytopathologia Mediterranea**, v. 50, p. 335– 349, 2011.

- ELLING, A. A. Major emerging problems with minor *Meloidogyne* species. **Phytopathology**, v. 103, p. 1092-1102, 2013. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-13-0019-RV>
- ELMER, W. H.; PIGNATELLO, J. J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils, **Plant Disease**, v. 95, p. 960–966, 2011. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741>
- FIGUEIREDO, C. C. D.; COSER, T. R.; MOREIRA, T. N.; LEÃO, T. P.; VALE, A. T. D.; PAZ-FERREIRO, J. Carbon mineralization in a soil amended with sewage sludge-derived biochar. **Applied Science**, v. 9, p. 4481, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9214481>
- FRENKEL, O., JAISWAL, A. K., ELAD, Y., LEW, B., KAMMANN, C.; GRABER, E. R. The effect of biochar on plant diseases: What should we learn while designing biochar substrates? **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 25, p. 105–113, 2017. <https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1307202>
- FU, P.; HU, S.; XIANG, J.; SUN, L.; SU, S.; WANG, J. Evaluation of the porous structure development of chars from pyrolysis of rice straw: effects of pyrolysis temperature and heating rate. **Journal Analysis Applied Pyrolysis**, v. 98, p. 177–183, 2012.
- GAO, S., DELUCA, T. H., & CLEVELAND, C. C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 463–472, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>
- GEORGE, C.; KOHLER, J.; RILLIG, M. C. Biochars reduce infection rates of the root-lesion nematode *Pratylenchus penetrans* and associated biomass loss in carrot. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 95, p. 11-18, 2016.
- GLASER, B.; LEHR, V.I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific Reports**, v. 9, p. 9338, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219–230, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- GRABER, E. R.; FRENKEL, O.; JAISWAL, A. K.; ELAD, Y. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? **Carbon Management**, v. 5, p. 169–183, 2014. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.91336>
- GRABER, E. R.; HAREL, Y. M.; KOLTON, M.; CYTRYN, E.; SILBER, A.; DAVID, D. R. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. **Plant Soil**, v. 337, p. 481–496, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0544-6>

HALLMANN, J.; KIEWNICK, S. Virulence of *Meloidogyne incognita* populations and *Meloidogyne enterolobii* on resistant cucurbitaceous and solanaceous plant genotypes. **Journal Plant Disease Protection**, v. 125, p. 415–424, 2018.

HUANG, W. K.; JI, H. L.; GHEYSEN, G.; DEBODE, J.; AND KYNDT, T. Biochar-amended potting medium reduces the susceptibility of rice to root-knot nematode infections. **BMC Plant Biology**, v.15, p. 267, 2015.

JAISWAL, A. K. Biochar as a management tool for soilborne diseases affecting early stage nursery seedling production. **Crop Protection**, v. 120, p. 34–42, 2019.

JAISWAL, A. K.; ELAD, Y.; GRABER, E. R.; FRENKEL, O. *Rhizoctonia solani* suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration, **Soil Biology & Biochemistry**, v. 69, p. 110–118, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.051>

JAISWAL, A. K.; FRENKEL, O.; ELAD, Y.; LEW, B.; GRABER, E. R. Non-monotonic influence of biochar dose on bean seedling growth and susceptibility to *Rhizoctonia solani*: the “Shifted Rmax-Effect”, **Plant and Soil**, v. 395, p. 1–16, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2331-2>

JONES, J. G.; KLECZEWSKI, N. M.; DESAEGER, J.; MEYER, S. L.; GORDON, C.J. Evaluation of nematicides for southern root-knot nematode management in lima bean. **Crop Protection**, v. 96, p. 151–157, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.02.015>

JOSEPH, S. D.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LIN, Y.; MUNROE, P.; CHIA, C. H.; HOOK, J.; VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; COWIE, A.; SINGH, B. P.; LEHMANN, J.; FOIDL, N.; SMERNIK, R. J.; AMONETTE, J. E. An investigation into the reactions of biochar in soil. **Soil Research**, v. 48, p. 501–515, 2010. <https://doi.org/10.1071/SR10009>

JOSEPH, S.; HUSSON, O.; GRABER, E. R.; VAN ZWIETEN, L.; TAHERYMOOSAVI, S.; THOMAS, T.; NIELSEN, S.; YE, J.; PAN, G.; CHIA, C. The electrochemical properties of biochars and how they affect soil redox properties and processes. **Agronomy**, v. 5, p. 322–340, 2015. <https://doi.org/10.3390/agronomy5030322>

JOSEPH, S.; POW, D.; DAWSON, K.; RUST, J.; MUNROE, P.; TAHERYMOOSAVI, S.; MITCHELL, D. R. G.; ROBB, S.; SOLAIMAN, Z. M. Biochar increases soil organic carbon, avocado yields and economic return over 4 years of cultivation. **Science of The Total Environment**, v. 724, p. 138-153, 2020.

KUMAR, A. ELAD, Y.; TSECHANSKY, L.; ABROL, V.; LEW, B.; OFFENBACH, R.; GRABER, E. R. Biochar potential in intensive cultivation of *Capsicum annuum* L. (sweet pepper): Crop yield and plant protection. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, p. 495–503, 2018. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8486>

LEHMANN, J.; ABIVEN, S.; KLEBER, M.; PAN, G.; SINGH, B. P.; SOHI, S. P.; ZIMMERMAN, A. R.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Persistence of biochar in soil. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.), **Biochar for environmental management: Science, technology and implementation**, v. 2, p. 233–280, 2015.

LEHMANN, J.; DA SILVA, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343–357, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>

LENG, L.; HUANG, H. An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. **Bioresource Technology**, v. 270, p. 627–642, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030>

LENG, L.; HUANG, H.; LI, H.; LI, J.; ZHOU, W. Biochar stability assessment methods: A review, **Science of The Total Environment**, v. 647, p. 210-222, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402>.

LUSTOSA FILHO, J. F.; DA SILVA CARNEIRO, J. S.; BARBOSA, C. F.; DE LIMA, K. P.; DO AMARAL LEITE, A.; MELO, L. C. A. Aging of biochar-based fertilizers in soil: effects on phosphorus pools and availability to *Urochloa brizantha* grass. **Science of the Total Environment**, v. 709, p. 136028, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136028>

MELO, F. B.; CARDOSO, M. J. Solos e adubação. In: BASTOS, E. A. (Ed.). **Cultivo de feijão-caupi**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Versão eletrônica. (Embrapa Meio-Norte).

POVEDA, J.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, Á.; FENOLL, C.; ESCOBAR, C. The use of biochar for plant-pathogen control. **Phytopathology**, v. 111:9, p. 1490-1499, 2021. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0248-RVW>

RAFIQ, M. K.; BAI, Y.; AZIZ, R.; RAFIQ, M. T.; MAŠEK, O.; BACHMANN, R. T.; JOSEPH, S.; SHAHBAZ, M.; QAYYUM, A.; SHANG, Z.; DANAEI, M.; LONG, R. Biochar amendment improves alpine meadows growth and soil health in Tibetan plateau over a three year period. **Science of the Total Environment**, v. 717, p. 135296, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135296>

RAHAYU, D. S.; SARI, N. P. Development of *Pratylenchus coffeae* in biochar applied soil, coffee roots and its effect on plant growth. **Pelita Per kebun**, v. 33, p. 24-32, 2017.

RAHMAN, L.; WHITELAW-WECKERT, M. A.; ORCHARD, B. Impact of organic soil amendments, including poultry-litter biochar, on nematodes in a Riverina, New South Wales, vineyard. **Soil Research**, v. 52, p. 604-619, 2014.

- ROSE, T. J.; SCHEFE, C.; WENG, Z. H.; ROSE, M. T.; VAN ZWIETEN, L.; LIU, L.; ROSE, A. L. Phosphorus speciation and bioavailability in diverse biochars. **Plant and Soil**, v. 443, n. 1–2, p. 233–244, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04219-2>
- SHETTY, R.; PRAKASH, N. B. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2020.
- SILBER, A.; LEVKOVITCH, I.; GRABER, E. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: Agronomic implications. **Environmental Science & Technology**, v. 44, p. 9318–9323, 2010. <https://doi.org/10.1021/es101283d>
- SINGH, B. P.; FANG, Y.; BOERSMA, M.; COLLINS, D.; VAN ZWIETEN, L.; MACDONALD, L. M. In situ persistence and migration of biochar carbon and its impact on native carbon emission in contrasting soils under managed temperate pastures. **PLoS One**, v.10, p. 0141560, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141560>
- SUN, D.; MENG, J.; LIANG, H.; YANG, E.; HUANG, Y.; CHEN, W. Effect of volatile organic compounds absorbed to fresh biochar on survival of *Bacillus mucilaginosus* and structure of soil microbial communities. **Journal Soils Sediment**, v. 15, p. 271–81, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0996-z>
- THIES, J. E.; RILLIG, M. C.; GRABER, E. R. Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. In: **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. J. LEHMANN; J. JOSEPH, ed. Earthscan, Londres, Reino Unido, 2015.
- TORRES-ROJAS, D.; HESTRIN, R.; SOLOMON, D.; GILLESPIE, A. W.; DYNES, J. J.; REGIER, T. Z.; LEHMANN, J. Nitrogen speciation and transformations in fire-derived organic matter. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, v. 276, p. 170–185, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.02.034>
- VILLETH, G. R. C.; CARMO, L. S. T.; SILVA, L. P.; FONTES, W.; GRYNBERG, P.; SARAIVA, M.; BRASILEIRO, A. C. M.; CARNEIRO, R. M. D.; OLIVEIRA, J. T. A.; GROSSI-DE-SÁ, M. F.; MEHTA, A. Cowpea–Meloidogyne incognita interaction: Root proteomic analysis during early stages of nematode infection. **Proteomics**, v. 15, p.1746-1759, 2015. <https://doi.org/10.1002/pmic.201400561>
- YUAN, H.; LU, T.; HUANG, H.; ZHAO, D.; KOBAYASHI, N.; CHEN, Y. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. **Journal Analysis Applied Pyrolysis**, v.112, p. 284–289, 2015.
- ZHANG, X. K.; QI, L. I.; LIANG, W. J.; ZHANG, M.; XUE-LIAN, B. A. O.; ZU-BIN, X. I. E. Soil nematode response to biochar addition in a Chinese wheat field. **Pedosphere**, v. 23, p. 98-103, 2013.

CAPÍTULO 5

**ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS INDUZIDAS PELO BIOCARVÃO
DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE UM ANO EM SOLO
CULTIVADO EM CASA DE VEGETAÇÃO COM FEIJÃO-CAUPI
INOCULADO COM *Meloidogyne incognita* MEDIDAS PELA
BIOANÁLISE DE SOLO**

ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS INDUZIDAS PELO BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO NO PERÍODO DE UM ANO EM SOLO CULTIVADO EM CASA DE VEGETAÇÃO COM FEIJÃO-CAUPI INOCULADO COM *Meloidogyne incognita* MEDIDAS PELA BIOANÁLISE DE SOLO

RESUMO

Os resultados relevantes obtidos com o biocarvão de lodo de esgoto (BCLE) no controle do *Mi* pela aplicação direta ou após a incubação trouxeram alguns questionamentos sobre as mudanças induzidas por sua aplicação no solo. Pois outros estudos, associam as alterações na microbiota pela aplicação dos biocarvões (BC's) de diferentes matérias-primas como o principal mecanismo de controle dos BC's sobre fitopatógenos no solo. Diante disso, o objetivo deste estudo foi de quantificar a ação do BCLE preparado a 300 °C e 500 °C em diferentes concentrações variando de 0,0% a 2,0% após a incubação por 360 dias, sobre as alterações na microbiota do solo, que influenciaram na dinâmica da infecção por *Mi* em plantas de feijão-caupi contribuindo para o seu controle. Essas medidas foram mensuradas pela bioanálise de solo-BioAs, que mostrou-se uma ferramenta eficaz na quantificação das mudanças decorrentes da aplicação desse material ao solo. Os resultados dos teores enzimáticos com a aplicação do BC300 1,0% aumentaram em 200,00% a arilsulfatase e em 110,00% a β -glicosidase em relação ao controle, indicando diferenças na microbiota nos solos avaliados. Os índices de qualidade do solo IQS_{Fertbio}, em conjunto ou separadamente (químico ou biológico), também mudaram entre solos avaliados após um ano da aplicação. Os diferentes parâmetros medidos pela BioAs se diferenciaram entre as concentrações de BCLE aplicadas, o tratamento padrão e a testemunha. Demonstrando que o uso desse insumo pode ser uma alternativa eficaz para melhorar aspectos microbiológicos do solo, fator fundamental para a sanidade vegetal e que contribui para uma agricultura mais sustentável.

Palavra-chave: Bioindicadores, Arilsulfatase, β -glicosidase

**BIOLOGICAL CHANGES INDUCED BY SEWAGE SLUDGE
BIOCHAR FROM A YEAR PERIOD IN SOIL IN A GREENHOUSE
CULTIVATED WITH COWPEA INOCULATED WITH
Meloidogyne incognita MEASURED BY SOIL BIOANALYSIS**

ABSTRACT

The relevant results obtained with the sewage sludge biochar-SSBC in the control of *Mi* raised some questions about the changes induced by its application in the soil. Among the possible mechanisms of action on the nematode, chemical and microbiological changes in the soil were the main hypotheses raised. Since several authors associate changes in soil microbiology through the application of biochars from different raw materials. Therefore, the objective of this study was to quantify the action of SSBC prepared at 300 °C and 500 °C in different concentrations ranging from 0.0 to 2.0% after incubation for 360 days, on the changes in the soil microbiota, which influenced the dynamics of *Mi* infection in cowpea plants, contributing to its control. These measurements were quantified through soil bioanalysis-BioAs, which proved to be an effective tool in quantifying the changes resulting from the application of this material to the soil. The results of the enzymatic levels with the application of SSBC300 1.0% increased by 200.00% the arylsulfatase and by 110.00% the β -glucosidase in relation to the control, indicating differences in the microbiota in the evaluated soils. The soil quality indices $SQI_{Fertbio}$, together or separately (chemical or biological), also changed between evaluated soils after one year of application. The different parameters measured by BioAs differed between the concentrations of SSBC applied to the control. Demonstrating that the use of this input can be an effective alternative to improve microbiological aspects of the soil, a fundamental factor for plant health and that collaborates with a more sustainable agriculture.

Keywords: Bioindicators, Arylsulfatase, β -glucosidase

1. INTRODUÇÃO

A quantificação da população de nematoides no sistema radicular nas avaliações dos ensaios do (CAP.III e CAP.IV), que se diferenciaram com o período de ação desse material sobre o solo, ação direta ou pela incubação ao longo de 180 e 360 DAA, mostraram resultados relevantes obtidos com a aplicação do BCLE no controle do *Mi*. E trouxeram alguns questionamentos sobre os diversos mecanismos de ação envolvidos no controle do nematoide. A literatura disponível sobre o assunto, mostra que os BC's são capazes de agir sobre patógenos vegetais de diversas formas, que vão desde a ação direta do material sobre o patógeno, a mudanças físicas, químicas e microbiológicas no solo que modificam fatores dentro do patossistema (POVEDA et al., 2021).

Recentemente, foi lançada a bioanálise de solo-BioAs pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa (MENDES et al., 2021). Com essa análise é possível quantificar fatores microbiológicos do solo, medidos através dos níveis enzimáticos presentes, que podem ser evidências de maior atividade de microrganismos no solo (MENDES et al., 2019). O uso da arilsulfatase e β -glicosidase, enzimas utilizadas como parâmetros na BioAs, são indicadoras do funcionamento da maquinaria biológica do solo. E o seu uso para essa finalidade, deve-se ao fato de que nem sempre as alterações nas propriedades químicas, em particular nos teores de MO, são capazes de expressar as modificações que ocorrem no solo decorrentes da adoção de sistemas de manejo diferentes, pois Latossolos de áreas agrícolas com características químicas semelhantes, podem apresentar características biológicas completamente distintas (MENDES et al., 2018, 2019).

E sendo a atividade enzimática total de um solo o somatório da atividade enzimática dos organismos vivos e das enzimas abiônicas associadas à fração não viva (WALLENSTEIN; BURNS, 2011). Quando quantificadas na BioAs, como estão ligadas ao ciclo do carbono e do enxofre e relacionadas à ciclagem da MO e ainda não sendo influenciadas pela aplicação de adubos e calcário no solo (MENDES et al., 2019), permitiram avaliar variações entre as temperaturas de pirólise e as concentrações do BCLE aplicadas, com os demais tratamentos do ensaio, que influenciaram as diferenças químicas no solo, no parasitismo do nematoide e na produção das plantas de FC quantificadas no capítulo anterior.

Todos esses fatores, demonstram que essas variáveis trazem respostas importantes dentro da premissa desenvolvida por este estudo. Como por exemplo, uma vez que pela supressão da infecção inicial limitando o acesso de patógenos aos tecidos da hospedeira, o BC pode adsorver enzimas patogênicas extracelulares e toxinas (liberadas pelos patógenos habitantes do solo para dissolver e causar danos às raízes) diminuindo suas concentrações na zona radicular e ficando adsorvida à superfície do BC no solo (JAISWAL et al., 2018).

Dentre essas respostas no solo e na planta discutidas acima, acerca dos patógenos o BC pode criar e manter condições na rizosfera que suportam o crescimento das plantas e a resiliência a uma série de pressões ambientais, como seca, calor, e poluentes ambientais (HUSSON et al., 2018). Assim, o BC pode criar condições na rizosfera que aumentam a absorção e o suprimento de nutrientes; imobiliza ou desativa substâncias orgânicas e minerais fitotóxicas; libera compostos bioativos que estimulam o crescimento e o desenvolvimento microbiológico e vegetal, promovendo organismos benéficos e inibindo a ação de patógenos (JOSEPH et al., 2021). Desse modo, o BCLE pode também estimular o crescimento das plantas, e a resiliência a doenças e estressores ambientais. Porém, para a série de mecanismos que podem envolver a aplicações de BC's e a sua ação na região da rizosfera, que são potencialmente responsáveis pelas respostas resultantes da interação planta/patógeno (GRABER et al., 2014). São difíceis de serem separadas e quantificadas, tanto a influência direta ou indireta do BC no solo / rizosfera / patógeno / microbioma / planta, (WANG et al., 2019).

Contudo, uma forma encontrada para essa quantificação, dentro das condições experimentais, foi a realização da BioAs, que por meio dos teores da arilsulfatase e da β -glicosidase aliada aos parâmetros da análise química do solo, cria o conceito Fertbio (MENDES et al., 2021). Portanto, o objetivo deste estudo foi de avaliar através da BioAs, os parâmetros associados a fertilidade química e biológica do solo, gerados pela análise enzimática e pelos índices de qualidade do solo IQS, que separadamente ou em conjunto podem ser indicadores de mudanças influenciadas pelo BCLE no patossistema *Mi/FC*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local e período de realização dos ensaios experimentais

Conforme descrito no CAP. IV.

2.2. Local coleta do lodo de esgoto e preparo do biocarvão

Conforme descrito no CAP. III.

2.3. Coleta e esterilização do solo utilizado nos experimentos

Conforme descrito no CAP. III.

2.4. Características físico-químicas do lodo de esgoto, do biocarvão de lodo de esgoto e do solo utilizados nos ensaios

Todas as características do solo estão descritas no CAP. IV, a testemunha 1 (test.1) é o Latossolo mantendo as condições naturais, e a testemunha 2 (test. 2) é o Latossolo corrigido com a aplicação de insumos (calcário e fertilizantes), segundo as recomendações nutricionais para a cultura do FC proposta por Melo e Cardoso (2017). Sendo comparadas à duas concentrações de BCLE 1,0% e 2,0%, preparado a 300°C e 500° C.

2.5. Incorporação do biocarvão de lodo de esgoto no solo

Conforme descrito no CAP.III.

2.6. Incubação do biocarvão de lodo de esgoto no solo

Conforme descrito no CAP.IV.

2.7. Plantas de feijão-caupi utilizadas no experimento

Conforme descrito no CAP.III.

2.8. Origem e manutenção do inóculo de *Meloidogyne incognita*

Conforme descrito no CAP.III.

2.9. Coleta de amostras de solo para a bioanálise

As amostras de solo, foram coletadas após 7 dias da retirada do sistema radicular das plantas de feijão-caupi, para a avaliação nematológica (CAP. IV). Retirando-se uma amostra de 150g de solo de cada vaso, correspondente a toda a região da zona de crescimento radicular das plantas, até 10cm de profundidade. Cada amostra simples, se juntou a outras amostras, seis no total, que foram misturadas em um béquer de 2L, formando uma amostra composta, de onde foram retiradas amostras de 300g de cada

tratamento, armazenadas em reservatório plástico e enviadas ao laboratório credenciado pela Embrapa.

2.10. Bioanálise

As bioanálises foram realizadas em laboratório credenciado pela Embrapa, seguindo os seus protocolos e recomendações.

2.10.1. Análise enzimática

As atividades da β -glicosidase e arilsulfatase (relacionadas ao ciclo do carbono e do enxofre, respectivamente) foram quantificadas em seus valores de pH ideal, em duplicatas, incluindo um controle, segundo Tabatabai, (1994). Devido aos seus curtos períodos de incubação (uma hora), o tolueno foi omitido dos ensaios. Essas determinações foram feitas diretamente em amostras de solo secas ao ar (MENDES et al., 2019a).

2.10.2. Análise química do solo

O conteúdo carbono orgânico (CO) foi medido usando o método Walkley-Black (NELSON; SOMMERS, 1996) e calculado de acordo com Jackson (1958). As análises químicas foram realizadas da seguinte forma: Ca^{+2} , Mg^{+2} e Al^{+3} foram extraídos com KCl 1 N e determinados por absorção atômica (Ca^{+2} e Mg^{+2}) e titulação com NaOH 0,025 M (Al^{+3}); P e K^{+} foram extraídos pelo método Mehlich 1 (H_2SO_4 0,0125 M + HCl 0,05 M), e determinados por espectrofotometria de chama (K^{+}) pelo método blue-Mo (P) (EMBRAPA, 1997).

O pH do solo foi determinado em CaCl_2 . A acidez titulável (H + Al) foi extraída com tampão acetato de cálcio 0,5 mol l⁻¹ pH 7,0 e determinada por análise volumétrica utilizando NaOH 0,025 mol l⁻¹ na presença de fenolftaleína como indicador ácido-base. A capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB) e saturação de bases (V%) foram calculadas da seguinte forma: $\text{CTC (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \text{acidez titulável em pH 7,0 (H + Al) + Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + (\text{K}^+/391)$; $\text{SB (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + (\text{K}^+/391)$, e $\text{V\%} = [(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + (\text{K}^+/391)]/\text{CTC} \times 100$ segundo protocolo descrito por Teixeira (2017).

2.10.3. Índices de qualidade do solo

O IQS contendo propriedades químicas (FERT) e biológicas (BIO) formando o (IQS_{FERTBIO}) proposto por Mendes et al. (2019), foi calculado com base nos modelos

propostos por Larson e Pierce (1991) e Karlen e Stott (1994). O IQS_{FERTBIO} leva em consideração três funções para o solo: (F1) a capacidade do solo de reciclar nutrientes; (F2) a capacidade do solo de armazenar nutrientes e (F3) a capacidade do solo para fornecer nutrientes. F1 tem como objetivo estimar o desempenho da atividade biológica e a processos derivados dele direta ou indiretamente, como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da MO. O desempenho dessa função foi definido pela atividade da β -glicosidase e arilsulfatase com base em estudos anteriores (LOPES et al., 2013; MENDES et al., 2019, 2021).

F2 visa quantificar o tamanho da reserva de nutrientes do solo que está principalmente relacionada com a textura, qualidade das argilas e o teor e qualidade da MO. Esta função foi calculada pelo CO e potenciais medidas da CTC. Por fim, F3 avalia a qualidade do conteúdo da reserva de nutrientes do solo, envolvendo ambos os aspectos relacionados à acidez do solo e a capacidade do solo em disponibilizar vários dos principais macronutrientes. Esta função é calculada por indicadores de disponibilidade de nutrientes (cátions básicos, P disponível, soma de bases e saturação por bases), bem como indicadores de acidez do solo (pH, acidez trocável (Al^{3+}) e acidez titulável em pH 7,0 (H + Al).

Todos os cálculos foram realizados utilizando o Sistema de Informações e Monitoramento Agrícola e Ambiental (SIMAA) desenvolvido pela Embrapa, com base no modelo proposto por Karlen e Stott (1994). Este software permite a modelagem e cálculos de IQS e estão disponíveis no artigo de Mendes et al. (2021).

Os resultados gerados pelo software, usam dados comparativos de solos com alta produtividade de grãos da região do Cerrado. Contudo, para a realização deste estudo, foram feitas comparações apenas entre os tratamentos avaliados, pois os solos de todos os tratamentos foram autoclavados. De forma que a temperatura acima dos 100 °C em que o solo foi submetido, desnatura todas as enzimas presentes naturalmente no solo, impossibilitando comparações com outros solos semelhantes.

2.11. Delineamento e análises estatísticas utilizadas na avaliação do experimento

O experimento foi avaliado em esquema fatorial (2 x 3), ou seja, 6 tratamentos avaliados. Dois tratamentos por temperaturas de pirólise de BCLE (300 °C - BC300 e 500°C – BC500) nas concentrações de (1,0% e 2,0%), mais a (testemunha 1 e a testemunha 2). Foram avaliadas três amostras de cada tratamento, distribuídas em delineamento inteiramente casualizado, ao total foram avaliadas 18 amostras.

Os dados obtidos foram tabulados no EXCEL® e para cada parâmetro, submetidos à análise de variância (teste F). Para as características que se mostraram significativas no teste F ($F \leq 0,05$), procedeu-se a comparação das médias dos tratamentos entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os cálculos referentes às análises estatísticas foram executados, utilizando o software SISVAR, desenvolvido na Universidade Federal de Lavras- UFLA (FERREIRA, 2019).

3. RESULTADOS

3.1. Fertilidade química do solo após um ano da aplicação do biocarvão de lodo de esgoto.

Os teores de CO aumentaram com a aplicação do BC300 e BC500 em todas as concentrações avaliadas. Os valores de pH foram reduzidos no solo após um ano da aplicação do BCLE, sendo que os menores valores encontrados de 5,32 e 5,31 respectivamente, são referentes às maiores concentrações avaliadas para ambos BC's (Tabela 1). O maior valor foi para o padrão com valor de 6,17 e o menor valor no BC500 2,0%.

Os teores de P aumentaram significativamente com a aplicação do BCLE, chegando a aumentos de 97,01% para BC300 2,0% em relação à testemunha e em 74,40% em relação à test. 2. Os valores de K foram superiores à testemunha, mas inferiores à test. 2. Os teores de Ca foram numericamente maiores na test. 2, no entanto, todos os tratamentos com a aplicação do BC também foram maiores se diferenciando da test. 1. Os teores de Mg aumentaram, com destaque para BC300 e BC500 a 1,0%.

Para a acidez potencial ($H^+ Al$) a test. 2 apresentou o menor valor, seguido pela test. 1. A aplicação do BCLE induziu um aumento substancial da acidez potencial do solo, com destaque para o BC300 1,0%, que teve um aumento de 48,52 ou de 1,94 vezes em relação à test. 2. Já para a CTC ou capacidade de troca catiônica o BC300 1,0% apresentou o maior valor, se diferenciando da test. 2 e test. 1. Os valores com a aplicação do BCLE foram numericamente superiores aos demais, porém se diferenciando somente da test. 1. A test. 2 apresentou o maior valor para a soma de bases SB e saturação de bases, se diferenciando dos demais tratamentos, onde as duas concentrações de BC300 e BC500 foram superiores à test. 1, porém sem se diferenciarem entre si.

Tabela 1. Fertilidade química de Latossolo Vermelho autoclavado, medida pelo CO-carbono orgânico, pH-potencial hidrogeniônico, P-fósforo, K-potássio, Ca-cálcio, Mg-magnésio, acidez titulável, CTC - capacidade de troca catiônica, SB - soma de bases e saturação de bases, após um ano da aplicação e incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas concentrações (1,0% e 2,0%), cultivado com feijão-caupi e inoculado com *Meloidogyne incognita* em casa de vegetação.

Tratamento	CO^b (g/Kg)	pH (CaCl ₂)	P (mg/dm ³)	K (cmolc/dm ³)	Ca (cmolc/dm ³)	Mg (cmolc/dm ³)	H+ Al (cmolc/dm ³)	CTC (cmolc/dm ³)	SB (S) (cmolc/dm ³)	Sat. de B (V%)
Testemunha 1	11,52 b	5,58 b	0,84 d	0,020 b	2,05 c	0,42 c	2,30 b	4,79 c	2,49 c	52,1 c
Testemunha 2	11,41 b	6,17 a	7,21 c	0,046 a	5,59 a	0,46 c	1,75 a	7,84 b	6,09 a	77,65 a
BCLE300-1%	12,00 a	5,52 b	24,72 ab	0,030 ab	4,96 ab	0,62 a	3,40 d	9,01 a	5,61 ab	62,24 b
BCLE500-1%	12,06 a	5,43 c	19,21 b	0,036 ab	4,60 b	0,66 a	2,90 c	8,19 ab	5,29 b	64,65 b
BCLE300-2%	12,19 a	5,32 d	28,17 a	0,026 ab	5,0 ab	0,50 bc	2,85 c	8,37 ab	5,52 ab	65,97 b
BCLE500-2%	11,93 a	5,31 d	23,31 ab	0,020 b	4,81 b	0,58 ab	2,75 c	8,16 ab	5,41 ab	66,19 b
Análise de Variância										
Valor de P	0,0000	0,0000	0,0000	0,0122	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV%^c	0,87	0,54	13,28	27,22	5,42	7,56	6,09	4,26	5,16	3,12

^aLetras minúsculas nas colunas indicam diferenças entre os tratamentos, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ^bC.O.: carbono orgânico do solo medido pelo método Walkley-Black, pH: potencial hidrogeniônico determinado em CaCl₂, H + Al: acidez titulável em pH 7,0, CTC: capacidade de troca catiônica = (acidez titulável em pH 7,0 (H + Al) + Ca⁺² + Mg⁺² + (K⁺/391)), SB: soma de bases = Ca²⁺ + Mg⁺² + (K⁺/391), Sat. de B: saturação de bases = [(Ca+2 + Mg+2 + (K+/391)] / CTC × 100); ^cCV%: coeficiente de variação. (Testemunha 1: solo preservando condições naturais, testemunha 2: solo corrigido).

3.2. Teores de enzimas bioindicadores de atividade microbiológica e de matéria orgânica do solo.

As amostras de solo avaliadas apresentaram diferenças nos teores enzimáticos presentes no solo, os teores de arilsulfatase com o uso do BC300 1,0% aumentaram 200%, ou seja, um teor duas vezes maior. Seguido por um aumento de 166% ou 1,66 vezes para o BC500 1,0%, em relação à test. 1 (Tabela 2). O BC300 2,0% e a test. 2 apresentaram aumentos respectivamente de 133,33% e 66,6%, apresentando aumentos nos teores enzimáticos de 1,33 e 0,66 vezes. Não houve diferenças entre BC500 2,0% e à test. 1, pois apresentaram os mesmos teores.

Tabela 2. Teores das enzimas (arilsulfatase e β -glicosidade) bioindicadoras da atividade microbiológica no solo, e matéria orgânica (MO) após o período de um ano da aplicação e incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas concentrações (1,0% e 2,0%), em amostras de Latossolo Vermelho autoclavado e com cultivo de feijão-caupi inoculado com *Meloidogyne incognita* em casa de vegetação.

Tratamento	Arilsulfatase	β -glicosidade	MO
	($\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$ solo h^{-1})	($\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$ solo h^{-1})	(g/Kg)
Testemunha 1	1,5 b	10,0 c	19,84 b
Testemunha 2	2,5 ab	11,0 c	19,66 b
BCLE300-1%	4,5 a	21,0 a	20,67 a
BCLE500-1%	4,0 a	14,5 bc	20,78 a
BCLE300-2%	3,5 ab	16,5 ab	21,01 a
BCLE500-2%	1,5 b	14,5 bc	20,55 a
Análise de Variância			
(Valor de P)	0,0029	0,0000	0,0000
CV% ^b	28,86	11,46	0,99

^aLetras minúsculas nas colunas indicam diferenças entre os tratamentos, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

^bCV%: coeficiente de variação. (Testemunha 1: solo preservando condições naturais, testemunha 2: solo corrigido).

Para a β -glicosidade o BC300 1,0% também se destacou com uma quantidade 110% maior, ou seja, um aumento de 1,1 vezes em relação à test.1, que seguido pelo BC300 2,0% aumentou 65% ou 0,65 vezes. O BC500 nas duas concentrações apresentou resultados semelhantes, com aumento em ambos de 45% ou 0,45 vezes. A test. 2 apresentou 10% de aumento ou 0,1 vezes, o menor aumento percentual em relação à test.1.

Em relação à matéria orgânica do solo (MO) a aplicação do BCLE nas diferentes concentrações aumentou os teores no solo diferindo da test. 2 e da test.1, com destaque para o BC300 2,0% que aumentou em 5,89%. O BC500 1,0%, BC300 1,0% e BC500 2,0% aumentaram em 4,73%, 4,18% e 3,57%, respectivamente. Para a MO a test. 2 apresentou uma redução de 0,91% em relação à test.1.

O índice de qualidade do solo (IQS), foi calculado e apresentou diferenças entre os tratamentos (Tabela 3). No IQS_{Fertbio} o BC300 2,0 %, 1,0% e BC500 1,0% apresentaram resultados com pequenas variações, se diferenciando dos demais tratamentos com aumento respectivamente de 81,81%, 78,78% e 75,75% em relação à test.1. Para esse parâmetro a test. 2 aumentou em 51,51%.

Na separação do IQS_{Fertbio} em dois subíndices denominados de IQS_{Biológico} e IQS_{Químico}, houve variações, com destaque para o BC300 1,0% que apresentou aumento de 56,25% no IQS_{biológico}, um valor 0,56 vezes maior do que a test.1. A test. 2 nesse parâmetro aumentou 18,75% em relação à test.1. Para o IQS_{químico} os valores do BC300 1,0%, e BC500 1,0% foram numericamente semelhantes e se diferenciando dos demais, com um aumento médio de 15% em relação à test. 2. Em relação à test.1, houve um aumento de 92,68% com o BC300 2,0%.

Tabela 3. Índices de qualidade e capacidades do solo em ciclar, armazenar e suprir nutrientes. Índice da atividade química e microbiológica (IQS_{Fertbio}), índice da atividade biológica (IQS_{Biológico}), índice da atividade química (IQS_{Químico}) em amostras de Latossolo Vermelho autoclavado, após um ano da aplicação e incubação do biocarvão de lodo de esgoto-BCLE (Pirólise: 300 °C; 500 °C) nas concentrações (1,0% e 2,0%), com cultivo de feijão-caupi inoculado com *Meloidogyne incognita*.

Tratamento	IQS _{Fertbio}	IQS _{Biológico}	IQS _{Químico}	Cicl. de Nutrientes	Armaz. de Nutrientes	Supr. de Nutrientes
Testemunha 1	0,33 c	0,16 d	0,41 c	0,16 d	0,45 b	0,37 d
Testemunha 2	0,50 b	0,19 bcd	0,66 b	0,19 bcd	0,80 a	0,51 c
BCLE300-1%	0,59 a	0,25 a	0,76 a	0,25 a	0,78 a	0,74 a
BCLE500-1%	0,58 a	0,22 abc	0,77 a	0,22 abc	0,81 a	0,72 a
BCLE300-2%	0,60 a	0,23 ab	0,79 a	0,23 ab	0,90 a	0,67 b
BCLE500-2%	0,52 ab	0,18 cd	0,69 ab	0,18 cd	0,71 a	0,68 b
Análise de Variância						
(Valor de P)	0,0000	0,0004	0,0000	0,0004	0,0003	0,0000
CV%	5,40	8,25	5,34	8,25	10,55	2,35

^aLetras minúsculas nas colunas indicam diferenças entre os tratamentos, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

^bCV%: coeficiente de variação. (Testemunha 1: solo preservando condições naturais, testemunha 2: solo corrigido).

Para o índice de armazenamento de nutrientes que foi calculado, todas as concentrações de BCLE e a test. 2 foram superiores à test.1. O aumento médio com a aplicação de BCLE em relação à test.1 foi de 77,7% nesse parâmetro, o mesmo aumento com a test. 2. O destaque foi para o BC300 2,0% que aumentou 100% em relação à test.1.

Para o suprimento de nutrientes do solo o BC300 e BC500 1,0% foram superiores aos demais, com aumento de 100% e 94,54%, respectivamente, seguido pelo BC300 e BC500 2,0% com aumento de 81,08 e 83,78%, respectivamente, em relação à test.1. Na test. 2 o aumento foi de 37,83%, um percentual menor em comparação com a adição de BCLE nas diferentes concentrações. Portanto, as diferentes concentrações de BCLE e a test. 2 aumentaram o suprimento de nutrientes do solo em relação à test.1.

4. DISCUSSÃO

Quantificar os impactos do BCLE preparado a 300 °C e 500 °C quando aplicado em concentrações crescentes de 0,0% a 2,0%, em solo cultivado com feijão-caupi e inoculado com *Mi* após um ano de sua aplicação, demonstrou que esse material foi capaz de reduzir a infecção e a população de nematoides na planta (CAP. IV), além de influenciar positivamente os parâmetros químicos e microbiológicos do solo. Essa visão mais ampla de aspectos microbiológicos em associação aos parâmetros da fertilidade química, mostrou-se uma ferramenta adicional para uma avaliação mais completa, demonstrando que há uma interação entre diversos fatores, que são impulsionados no solo pela aplicação do BCLE que podem interferir no parasitismo de *Mi*.

Notadamente, os BC's de acordo com a matéria-prima são capazes de modificar significativamente a quantidade de macro e micronutrientes no solo (SCHREITER et al., 2020). No ensaio, o BCLE aumentou os teores de P, K, Mg e Ca, todos elementos essenciais e importantes no desenvolvimento das plantas de FC. Esses aumentos na quantidade de macronutrientes provenientes do BCLE, atingiram os valores recomendados para a cultura do FC (MELO; CARDOSO, 2017). E mesmo que o P e Mg que tiveram os teores aumentados com a aplicação, e estejam ligados a fatores fisiológicos importantes no metabolismo das plantas, os ganhos decorrentes da aplicação do BCLE podem ser maiores, levando em consideração os parâmetros ligados à microbiota do solo.

A absorção de macronutrientes pode estar relacionada a aspectos microbiológicos, pois somente a colonização radicular por fungos micorrízicos, que podem estar presentes em maiores quantidades com a aplicação de BC aumentam a eficiência na absorção de P

em até 75%, em comparação a 20% em tratamentos com fertilizantes minerais (BLACKWELL et al., 2015). Em solos com baixo teor de P, como o solo usado no ensaio, é provável que fungos micorrízicos arbusculares (FMA) colonizem as partículas do BC, especialmente daqueles com alto teor de P na superfície dos poros, como o BCLE, o que pode aumentar a absorção de P pelas plantas (VANEK; LEHMANN, 2015; SOLAIMAN; ABBOTT; MURPHY, 2019; GUJRE et al., 2020).

Nas condições experimentais controladas, antes da aplicação do BCLE, o solo autoclavado via calor úmido modificou os teores naturais das enzimas presentes no solo, em relação a teores considerados adequados para Latossolos cultivados ou em ambientes naturais de Cerrado, uma vez que todas as enzimas naturais foram desnaturadas nesse processo. Mesmo em um ambiente com alguns fatores controlados, nota-se que o BCLE aplicado ao solo no espaço de tempo de um ano, promoveu alterações significativas em parâmetros microbiológicos medidos através dos índices de qualidade do solo (IQS) por meio da bioanálise-BioAs (EMBRAPA, 2018).

As mudanças decorrentes da aplicação e medidas por esses parâmetros, são indicadores de maior atividade biológica, como é o caso dos níveis de arilsufatase e β -glicosidase, que em conjunto ou separadamente, apresentam maior sensibilidade para detectar alterações no solo, em função do sistema de manejo utilizado (MENDES et al., 2019). Essas duas enzimas apresentam uma estreita relação com a MOS, e com a aplicação do BCLE, houve um aumento médio de 4,4% nesse parâmetro, diferentemente da test. 2 e da test.1 que tiveram seus valores reduzidos ou mantidos, respectivamente.

Elas podem se ligar aos microaglomerados que se formam nas superfícies internas e externas do BCLE, que consistem em minerais nanoparticulados ligados a moléculas orgânicas que são constituídas de C que se ligam a outras moléculas orgânicas, com concentrações significativas de -C-O, e grupos funcionais -C=O, -COOH (JOSEPH et al., 2010). Pesquisas recentes indicam que muitas das reações induzidas por BC's ocorrem sobre ou nos microaglomerados (JOSEPH et al., 2021).

Os fungos e bactérias que habitam os maiores poros do BCLE com maiores teores de nutrientes ($> 2 \mu\text{m}$), mineralizam os nutrientes do BC, junto àqueles que foram absorvidos do solo, capturando os exsudatos radiculares, metabólitos microbianos e a massa da decomposição microbiana, formando os microaglomerados e incrementando os níveis de CO e, portanto, resultando em aumento da MO. Aliado a esse processo, essas pequenas partículas de BCs formadas, podem migrar para a superfície da raiz e podem

alterar a população de bactérias específicas associadas às raízes (KOLTON et al., 2011; CHEW et al., 2020).

Assim, os aumentos nos teores de MO são decorrentes das grandes quantidades de C presentes nos BCLE, e da formação dos microaglomerados capazes de se ligarem às diferentes moléculas orgânicas produzidas pela microbiota adicionada supostamente, via sementes de FC que estavam presentes endofiticamente, parasitando ou em associação com o inóculo de *Mi*, água de irrigação ou até mesmo pelo ar dentro da casa de vegetação. Dessa forma, o ambiente experimental, mesmo que protegido, esteve exposto a fatores microbiológicos que interagiram no solo.

Portanto, diversos autores atualmente, relacionam os BC's com aumento na biomassa e atividades microbianas (POKHAREL; MA; CHANG, 2020). Esses fatores corroboram com os resultados encontrados neste estudo, onde o BC300 1,0% apresentou um valor três vezes maior para a arilsulfatase com aumento de 66,6%, e duas vezes maior para β -glicosidase com aumento de 52,4%. Esses aumentos, podem ser um indício de aumentos na comunidade microbiana. Corroborando com essa tese, uma meta-análise identificou que os BC's independentemente da fonte de matéria-prima, são capazes de aumentar o C da biomassa microbiana e as atividades das enzimas urease, fosfatase alcalina e desidrogenase em 22%, 23%, 25% e 20%, respectivamente, com maiores efeitos em solos ácidos de textura fina (POKHAREL; MA; CHANG, 2020).

Estes aumentos nas atividades enzimáticas, bem como as mudanças na diversidade e atividade da comunidade microbiana podem estar diretamente ligadas a fatores como o aumento ou redução do pH, após a adição de BC's (JAISWAL et al., 2018). Após um ano da aplicação, houve uma pequena redução do pH do solo, porém significativa, principalmente nas maiores concentrações de BCLE, esse fator é relevante, pois a acidez ou alcalinidade do solo pode ser um fator regulador da composição microbiana (ROUSK et al., 2010).

Outros fatores, como os físicos não mensurados neste estudo, também podem estar relacionados ao aumento da aeração, e conseqüentemente melhorando as condições para fungos e bactérias aeróbicas produzirem enzimas oxidativas (CUI et al., 2020). Essas alterações em conjunto, ou individualmente promovem mudanças nas necessidades metabólicas dos microrganismos, devido à prevalência de grandes quantidades de compostos orgânicos e conseqüentemente, beneficiando ou prejudicando determinadas comunidades da microbiota na rizosfera (JAISWAL et al., 2018).

Os maiores teores enzimáticos, presentes no solo com a aplicação do BCLE, podem ser uma evidência de um modo de ação sobre os patógenos de solo, através da adsorção de moléculas de sinalização microbiana, como por exemplo (acil-homoserina lactona), onde as superfícies do BC podem interromper a comunicação microbiana do solo, o que poderia reduzir os efeitos de patógenos (MASIELLO et al., 2013; GAO et al., 2016). Os BC também adsorvem enzimas patogênicas e metabólitos tóxicos exsudados por patógenos do solo, reduzindo assim a concentração de fatores de virulência na zona radicular e diminuindo a severidade da doença (JAISWAL et al., 2018).

Dessa forma, os BC's não somente aumentam a microbiota, mas também podem induzir mudanças significativas nas proporções de fungos para bactérias e bactérias Gram-positivas para Gram-negativas (ZHANG et al., 2018). Porém, há um limite para essa forte influência do BCLE, e isso fica demonstrado com as diferenças entre as concentrações e entre as duas temperaturas de pirólise.

O BC300 2,0% mesmo apresentando o dobro de material aplicado ao solo em comparação ao BC300 1,0%, ainda que com maior valor de MO, obteve menor teor enzimático. E o BC500 apresentou menores teores em comparação ao BC300, e uma redução entre as suas concentrações para arilsulfatase, mantendo os níveis em relação à β -glicosidase independente da concentração. Conforme as respostas descritas por Li et al. (2020) que apresentaram melhores resultados com o uso de BC's de matérias primas ricas em nutrientes preparados em temperaturas de pirólise menores (< 300 °C) e aplicados em baixas concentrações (< 50 Mg ha⁻¹)

Os autores acima descreveram um efeito negativo da aplicação de altas taxas de BC's (> 50 Mg ha⁻¹) na diversidade microbiana e sugeriram as seguintes causas potenciais: (i) introdução de componentes tóxicos que inibem algumas espécies; (ii) aumento das relações C/N da matéria orgânica do solo que limita a utilização do C microbiano, mas ponderam que possivelmente apenas a curto prazo e apenas na medida em que o C orgânico é metabolizado (LI et al., 2020).

Na região de Cerrado, o C da MO é um indicador de qualidade do solo e que foi associado a ambientes agrícolas com maior rendimento de grãos em Latossolos (LOPES et al., 2013, 2015, 2018). Portanto, espera-se que a longo prazo um insumo capaz de aumentar potencialmente esse parâmetro, pode indicar melhorias até mesmo no rendimento econômico das lavouras que é fundamental para a sustentabilidade do negócio agrícola (LOPES et al 2018; MENDES et al., 2019).

Contudo, as duas enzimas quantificadas neste estudo, mesmo que estejam relacionadas à ciclagem da MOS, não são influenciadas pela aplicação de insumos agrícolas (adubos e calcário) (MENDES et al., 2019). Nesse sentido, mesmo em um intervalo temporal de um ano, a sensibilidade, precisão e coerência da BioAs, permitiram a avaliação e comparação dos tratamentos experimentais que se adequaram ao conceito Fertbio de amostragem de solo proposto por Mendes et al. (2021). Esse conceito pela medida e associação de um conjunto de fatores, permitiram uma avaliação complexa dos índices químicos e biológicos induzidos pelo BCLE.

Mesmo que devido à condição experimental de autoclavagem do solo, não seja possível compararmos com níveis de outros Latossolos, de todos os índices obtidos no ensaio, avaliando o $IQS_{Fertbio}$ ou separadamente o $IQS_{Biológico}$ e $IQS_{Químico}$, a aplicação do BC300 apresentou melhores índices, sendo superiores à test. 2. Portanto, os cálculos dos IQSs da BioAs, baseados no conceito proposto por Karlen e Stott (1994), leva em consideração a capacidade do solo funcionar para prestar importantes serviços ambientais que é uma característica fundamental para uma produção agrícola sustentável (MENDES et al., 2021). Essa visão geral dos tratamentos no ensaio com o BCLE, resultou em melhores escores nas funções de ciclagem, armazenamento e suprimento de nutrientes do solo, com destaque para o BC300 1,0%, que melhorou a qualidade nutricional e biológica do solo em todas os parâmetros avaliados.

5. CONCLUSÕES

A aplicação do BCLE aumentou os teores de macronutrientes, matéria orgânica e os níveis de arilsulfatase e β -glicosidade, melhorando a ciclagem o armazenamento e o suprimento de nutrientes, assim como todos os índices de qualidade do solo avaliados. A concentração de 1,0% do BC300 foi mais efetiva na melhoria dos bioindicadores medidos. A bioanálise permitiu uma visão mais completa da atuação do BCLE na fertilidade química e dos aspectos de sua influência sobre a microbiota do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLACKWELL, P.; JOSEPH, S.; MUNROE, P.; ANAWAR, H. M.; STORER, P.; GILKES, R. J.; SOLAIMAN, Z. M. Influences of biochar and biochar-mineral complex on mycorrhizal colonization and nutrition of wheat and sorghum. **Pedosphere**, v. 25, n. 5, p. 686-695, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30049-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30049-7)

CHEW, J.; ZHU, L.; NIELSEN, S.; GRABER, E.; MITCHELL, D. R.; HORVAT, J.; MOHAMMED, M.; LIU, M.; VAN ZWIETEN, L.; DONNE, S.; MUNROE, P.; TAHERYMOOSAVI, S.; PACE, B.; RAWAL, A.; HOOK, J.; MARJO, C.; THOMAS, D. S.; GENXING, P.; LI, L.; BIAN, R.; MCBEATH, A.; BIRD, M.; THOMAS, T.; HUSSON, O.; SOLAIMAIN, Z.; JOSEPH, S.; FAN, X. Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. **Science of The Total Environment**, v.713, p.136431, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136431>

CUI, J.; ZHU, Z.; XU, X.; LIU, S.; JONES, D. L.; KUZYAKOV, Y.; SHIBISTOVA, O.; WU, J.; GE, T. Carbon and nitrogen recycling from microbial necromass to cope with C: N stoichiometric imbalance by priming. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p.107720, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107720>

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual e métodos de análise de solo**, 2ª edição, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 1997. Disponível em https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5oo0q43a0ram31wtr.pdf. Acesso em 09 de set. de 2020.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Circular Técnica 38, Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, 24p., 2018. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1110832/bioanalise-de-solo-como-acessar-e-interpretar-a-saude-do-solo>. Acesso em 20 fev. de 2022.

GAO, X.; CHENG, H.-Y.; DEL VALLE, I.; LIU, S.; MASIELLO, C. A.; SILBERG, J. J. Charcoal disrupts soil microbial communication through a combination of signal sorption and hydrolysis. **Acs Omega**, v.1, n. 2, p. 226-233, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsomega.6b00085>

GRABER, E. R.; FRENKEL, O.; JAISWAL, A. K.; ELAD, Y. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? **Carbon Management**, v. 5, n. 2, p. 169-183, 2014. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.913360>

GUJRE, N.; SONI, A.; RANGAN, L.; TSANG, D. C.; MITRA, S. Sustainable improvement of soil health utilizing biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: A review. **Environmental Pollution**, v. 268, p. 115549, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115549>

HUSSON, O.; AUDEBERT, A.; BENADA, J.; SOGLONOU, B.; TANO, F.; DIENG, I.; BOUSSET, L.; SARTHOU, J.-P.; JOSEPH, S.; MENOZZI, P. Leaf Eh and pH: A novel

indicator of plant stress. Spatial, temporal and genotypic variability in rice (*Oryza sativa* L.). **Agronomy**, v. 8, p. 209, 2018. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100209>

JACKSON, M. L., 1958. Soil chemical analysis. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200030025x>.

JAISWAL, A. K.; ELAD, Y.; CYTRYN, E.; GRABER, E. R.; FRENKEL, O. Activating biochar by manipulating the bacterial and fungal microbiome through pre-conditioning. **New Phytologist**, v. 219, p. 363-377, 2018. <https://doi.org/10.1111/nph.15042>

JAISWAL, A. K.; FRENKEL, O.; TSECHANSKY, L.; ELAD, Y.; GRABER, E. R. Immobilization and deactivation of pathogenic enzymes and toxic metabolites by biochar: A possible mechanism involved in soilborne disease suppression. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 121, p. 59-66, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.001>

JOSEPH, S.; COWIE, A. L.; VAN ZWIETEN, L.; BOLAN, N.; BUDAI, A.; BUSS, W.; CAYUELA, M. L.; GRABER, E. R.; IPPOLITO, J. A.; KUZYAKOV, Y.; LUO, Y.; OK, Y. S.; PALANSOORIYA, K. N.; SHEPHERD, J.; STEPHENS, S.; WENG, Z.; LEHMANN, J. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **GCB Bioenergy**, v.13, p. 1731– 1764, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E., A framework for evaluating physical and Chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. R.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America. p. 53-72. (Special Publication, 35), 1994.

KOLTON, M.; HAREL, Y. M.; PASTERNAK, Z.; GRABER, E. R.; ELAD, Y.; CYTRYN, E. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 77, n. 14, p. 4924-4930, 2011. <https://doi.org/10.1128/AEM.00148-11>

LI, X.; WANG, T.; CHANG, S. X.; JIANG, X.; SONG, Y. Biochar increases soil microbial biomass but has variable effects on microbial diversity: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 749, p. 141593, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141593>

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 461-472, 2013. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C. Air-drying and longterm storage effects on β -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical Savannah Oxisol. **Applied Soil Ecology**, v. 93, p. 68–77, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.04.001>.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72–82, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.003>

MASIELLO, C. A.; CHEN, Y.; GAO, X.; LIU, S.; CHENG, H.-Y.; BENNETT, M. R.; RUDGERS, J. A.; WAGNER, D. S.; ZYGOURAKIS, K.; SILBERG, J. J. Biochar and microbial signaling: production conditions determine effects on microbial communication. **Environmental science & technology**, v. 47, p. 11496-11503, 2013. <https://doi.org/10.1021/es401458s>

MELO, F. B.; CARDOSO, M. J. Solos e adubação. In: BASTOS, E. A. (Ed.). **Cultivo de feijão-caupi**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Versão eletrônica. (Embrapa Meio-Norte. 2017. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1071735>

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; DANTAS, O. D.; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L.; CHAER, G. M. Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical Oxisols. **Geoderma**, v. 388, p. 114880, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880>

MENDES, I. C.; SOUZA, L. M.; SOUSA, D. M. G.; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B.; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

MENDES, I.C.; TORMENA, C.A.; CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L. Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. In: REICOSKY, D. (Org.). **Managing soil health for sustainable agriculture: Monitoring and management**. 1ed. Burleigh Dodds Science publishing, Cambridge, v. 2, p. 379-415, 2018. <https://doi.org/10.19103/AS.2017.0033.35>.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D.L. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Part 3. Chemical methods. SSSA Book Ser.5. SSSA, Madison, p. 961 – 1010, 1996. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>

POKHAREL, P.; MA, Z.; CHANG, S. X. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis. **Biochar**, p.1-15, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00039-1>

POVEDA, J.; MARTÍNEZ GÓMEZ, Á.; FENOLL, C.; ESCOBAR, C. The use of biochar for plant-pathogen control. **Phytopathology**, v. 111:9, p. 1490-1499, 2021. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0248-RVW>

ROUSK, J.; BÅÅTH, E.; BROOKES, P. C.; LAUBER, C. L.; LOZUPONE, C.; CAPORASO, J. G.; KNIGHT, R.; FIERER, N. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. **The ISME Journal**, v. 4, p. 1340-1351, 2010. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>

SCHREITER, I. J.; SCHMIDT, W.; KUMAR, A.; GRABER, E. R.; SCHÜTH, C. Effect of water leaching on biochar properties and its impact on organic contaminant sorption. **Environmental Science and Pollution Research**, 27, p. 691-703, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06904-2>

SOLAIMAN, Z. M.; ABBOTT, L. K.; MURPHY, D. V. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. **Scientific reports**, v. 9, p. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41671-7>

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. p. 778–833. In R.W. Weaver et al. (ed.). **Method of Soil Analysis**. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, 1994. <https://doi.org/10.1002/047126363X.agr354>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; WENCESLAU GERALDES TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. 574 p. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <ManualdeMetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf>. Acesso em 04 de abril de 2022.

VANEK, S. J.; LEHMANN, J. Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar. **Plant and soil**, v. 395, p. 105-123, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2246-y>

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.

WALLENSTEIN, M. D.; BURNS, R. G. Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: a complex community-driven process. In **Methods of Soil Enzymology**, R.P. DICK (Ed.), 2011. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c2>

WANG, M.; WANG, J. J.; TAFTI, N. D.; HOLLIER, C. A.; MYERS, G.; WANG, X. Effect of alkali-enhanced biochar on silicon uptake and suppression of gray leaf spot development in perennial ryegrass. **Crop Protection**, v. 119, p. 9-16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.01.013>

ZHANG, L.; JING, Y.; XIANG, Y.; ZHANG, R.; LU, H. Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: a meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 643, p. 926-935, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.231>

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

O uso do biocarvão está sendo difundido em vários países, em alguns deles já existem diversos produtos comerciais a base desse material obtidos por pirólise de diversas fontes de biomassa. Porém, o uso do biocarvão de lodo de esgoto, especificamente, ainda é experimental e é foco de alguns grupos de pesquisa das principais universidades, demonstrando que isso é uma temática global. Portanto, esse uso experimental, é realizado nas diferentes áreas do conhecimento que vão desde o uso como absorvedor de poluentes ambientais em ambientes aquáticos, como nas aplicações agrícolas e até fitopatológicas, que é o caso do presente estudo.

Nesse sentido, este estudo contribui para a investigação de um dos pontos chave dentro do atual cenário agrícola mundial, que é a produção de alimentos, fibras e energia através do aproveitamento de resíduos, tornando em parte, essa cadeia produtiva menos impactantes ao meio ambiente, e tornando-a mais sustentável. Portanto, esse é um longo caminho a ser trilhado e os resultados aqui apresentados são parte de uma pesquisa básica, mas que responde a alguns questionamentos importantes, como demonstrar que o BCLE é capaz de reduzir os danos de um patógeno importante para agricultura.

Não obstante ainda, ser fonte de nutrientes essenciais ao solo, que permitem maior desenvolvimento e produção de plantas de feijão-caupi, um cultivo em expansão no Brasil, possuindo importância econômica e social para o país, principalmente nas famílias de pequenos produtores, que atendem uma cadeia local na qual o consumo dos seus grãos representa parte das necessidades nutricionais diárias dessa população. Dessa forma, estudos como este são cada vez mais necessários para a solução de problemas complexos, como a diminuição da poluição por rejeitos e o aumento da sanidade e produção vegetal.

Contudo, ao final deste estudo, algumas hipóteses foram provadas como a viabilidade desse material no controle de *Meloidogyne incognita* em casa de vegetação. Porém, esse é apenas um pequeno passo, de uma longa caminhada na busca pela elucidação e desenvolvimento da melhor concentração de efeito, mecanismos de supressão e controle, mudanças induzidas na microbiota. Por conseguinte, mais pesquisas são necessárias para que o seu uso se justifique e que seja economicamente viável a utilização desse material como condicionante melhorador de solo, fertilizante e agente de controle sanitário vegetal.