



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

JANARDELLY GOMES DE SOUZA

**INTERAÇÕES ENTRE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ADUBAÇÕES
NITROGENADAS NO CULTIVO DA *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDU E
NOS ATRIBUTOS DO SOLO**

Presidente Prudente - SP
2021



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

JANARDELLY GOMES DE SOUZA

**INTERAÇÕES ENTRE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ADUBAÇÕES
NITROGENADAS NO CULTIVO DA *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDU E
NOS ATRIBUTOS DO SOLO**

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional – Área de concentração: Ciências Ambientais

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Alves

Coorientadores:
Prof. Dr. Carlos Henrique dos Santos
Prof. Dra. Rita de Cássia Lima Mazzuchelli

631.42
S729i

Souza, Janardelly Gomes de.

Interações entre resíduos orgânicos e adubações nitrogenadas no cultivo da *Urochloa brizantha* cv. Marandu e nos atributos do solo / Janardelly Gomes de Souza. – Presidente Prudente, 2021.

206 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2021.

Bibliografia.

Orientador: Dr. Marcelo Rodrigo Alves

Coorientador: Dr. Carlos Henrique dos Santos

Dr. Rita de Cássia Lima Mazzuchelli

1. Condicionador de solos. 2. Biocarvão. 3. Fertilidade do Solo. 4. Biologia do Solo. 5. Produtividade.
I. Título.

JANARDELLY GOMES DE SOUZA

**INTERAÇÕES ENTRE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ADUBAÇÕES
NITROGENADAS NO CULTIVO DA *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDU E
NOS ATRIBUTOS DO SOLO**

Dissertação apresentada Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional - Área de Concentração: Ciências Ambientais

Presidente Prudente, 28 de setembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Alves
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente - SP

Prof. Dr. Rafael Montanari
Universidade Estadual Paulista – Unesp
Ilha Solteira - SP

Prof. Dra. Leila Maria Sotocorno e Silva
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente - SP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, Criador de todas as coisas, por ser presente em minha vida e ter me ajudado do início ao fim, dando perseverança e força em todos os momentos.

Dedico aos meus pais, Josué Freitas de Souza e Evanilda Silva Gomes de Souza, que são minha base e força, pois sempre me apoiaram e estiveram presentes em todos os meus anos de estudo, fazendo grandes esforços para que eu atingisse meus objetivos.

Dedico a minha avó, Maria Elena Gomes, que sempre esteve presente durante esse período importante da minha vida, sempre me perguntando sobre o andamento do projeto, me apoiando com seu carinho, amizade e companheirismo.

Dedico ao meu avô, João Lino Gomes (in memoriam), que sempre me inspirou, por ter sido uma pessoa temente a Deus, batalhador, generoso e carregado de histórias e conselhos para nos transmitir e, que me apoiou no início dos meus estudos.

Dedico aos meus avós paternos, Romagueiro Santos de Souza e Francisca Freitas de Souza e, aos meus familiares que sempre estiveram presente durante a realização desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e, por ser sempre presente em todos os momentos, me ajudando do início a conclusão desse projeto.

Aos meus pais, Evanilda Silva Gomes de Souza e Josué Freitas de Souza, por todo apoio, incentivo, confiança, colaboração e carinho durante todo o desenvolvimento do projeto.

A minha avó, Maria Helena Gomes pelo amor e incentivo durante este período.

Ao professor orientador, Dr. Marcelo Rodrigo Alves pelos ensinamentos desde a graduação, pela paciência, pela confiança, pelo incentivo e pela dedicação em todo o decorrer do projeto.

A professora coorientadora, Dra. Rita de Cássia Lima Mazzuchelli pela colaboração, pela ajuda, pela disposição e pelo carisma, pois em todos os momentos que necessitei sempre foi muito acessível.

Ao professor coorientador, Dr. Carlos Henrique dos Santos pela concessão da utilização do Laboratório de Solos e Tecidos Vegetais, pela colaboração e pela disposição em passar seus conhecimentos sempre que necessário.

Ao prof. Dr. Fábio Fernando de Araújo pela concessão da utilização do Laboratório de Biologia do Solo.

Ao prof. Dr. Sílvio Rainho Teixeira, da Universidade Estadual Paulista - Campus de Presidente Prudente, pelo auxílio na realização da análise de Espectrometria de Fluorescência de Raio X (FRX).

Ao Gilmar José Peixoto, gerente do setor de Produção de Águas e Tratamento de Esgoto de Presidente Prudente e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP, pela concessão do biossólido para estudo.

Aos alunos da graduação que me auxiliaram no decorrer do projeto, em especial Bruna Caroline dos Santos, Evanilda Silva Gomes de Souza (mãe) e Maria Eduarda da Silva Costa que estiveram comigo desde o início até a conclusão.

Aos funcionários e amigos dos Laboratórios do Bloco Q em que realizei análises Edna Torquato, Daniel Ângelo, Daniela Damasceno, Diego Magalhães, Flávio Coelho, Joce Martines, Lindaura Helena, Luciana Muchiutti, Luma Correa, Luiz Monzani, Maria Aparecida Nascimento, Murilo Oliveira e Viviane Ferreira que me acolheram, com toda atenção e carinho, sempre me ajudando, não medindo esforços para passarem seus conhecimentos.

Aos funcionários do viveiro, em especial a Murilo Dogna e Antonio Donizete pelo apoio na realização de algumas atividades durante a execução e desenvolvimento do projeto.

A Universidade do Oeste Paulista - UNOESTE e ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional pela oportunidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - (Brasil) CAPES - Código de Financiamento 001".

*“Sem sonhos, a vida não tem brilho.
Sem metas, os sonhos não têm alicerces.
Sem prioridades, os sonhos não se tornam
reais. Sonhe, trace metas, estabeleça
prioridades e corra riscos para executar
seus sonhos. Melhor errar por tentar do
que errar por se omitir”. (Augusto Cury)*

RESUMO

Interações entre resíduos orgânicos e adubações nitrogenadas no cultivo da *Urochloa brizantha* cv. Marandu e nos atributos do solo

O biossólido é um resíduo gerado durante o tratamento das águas residuárias na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O mesmo é rico em matéria orgânica e nutrientes, porém existem limitações para seu uso. Uma alternativa viável para utilização desse resíduo é a sua transformação em biocarvão por meio da pirólise, associando os benefícios inerentes ao biocarvão, eliminando a presença de patógenos do biossólido que é uma das principais limitações para sua aplicação. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo principal avaliar se aplicações de resíduos orgânicos e biocarvões individuais ou combinados com adubação nitrogenada interferem nos atributos do solo e no desenvolvimento da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Assim, numa primeira etapa os biocarvões foram produzidos a partir da amostra seca de biossólido e, uma amostra seca de bagaço de cana-de-açúcar, separadamente, por meio da pirólise lenta a temperatura de 350°C, os quais foram caracterizados através das análises físicas, químicas e de balanço de massas. Numa segunda etapa foi instalado um experimento em delineamento inteiramente casualizados (DIC), com esquema fatorial 7x4 e 5 repetições, sendo que os tratamentos foram constituídos por 7 composições de substrato sendo eles: solo controle (SC); solo + 300 g de biossólido puro (BP); solo + 100 g de bagaço de cana-de-açúcar puro (BCP); solo + 150 g de biossólido puro + 50 g de bagaço de cana-de-açúcar puro (BP+BCP); solo + 300 g de biocarvão de biossólido (BB); solo + 100 g de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar (BBC); solo + 150 g de biocarvão de biossólido + 50 g de biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar (BB+BBC); e 4 doses de adubação nitrogenada mineral: 0; 12,5; 25 e 50 mg dm⁻³. Ao todo foram realizados 4 cortes nas plantas aos 60, 88, 116 e 144 dias após o plantio. O desenvolvimento do capim Marandu foi avaliado por meio das variáveis fisiológicas: produção de massa foliar, produção de massa radicular, teor de nitrogênio total e carbono orgânico nos tecidos vegetais. Quanto ao solo, foram avaliados os atributos químicos e biológicos, após o cultivo do capim Marandu. Para isso foram realizadas análises de caráter químico (determinação dos teores de pH, teor de matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, N-total, N-inorgânico e Carbono Orgânico Total) e, biológico (respiração basal do solo, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, atividade da enzima desidrogenase e hidrólise de diacetato de fluoresceína). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo programa SISVAR. Para comparação de médias, foi utilizado o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). No capítulo I, após a caracterização dos materiais verificou-se que os resíduos orgânicos e biocarvões apresentaram características propícias para o uso agrícola, principalmente o BP e o BB em termos de fertilidade, por evidenciarem maiores valores de nutrientes e CTC. O BP e o BB podem ser utilizados como corretivo de solos, por apresentarem um pH alcalino de 12,02 e 9,64. Já no capítulo II, a aplicação dos materiais no solo apresentou efeitos positivos onde o solo com inserção de BP na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ evidenciou maiores valores em relação a produtividade da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. E, solos com adição de BP e BB, individual ou combinado com ADN, proporcionou aumento no pH, CTC e saturação por bases. Sendo que a adição de resíduos orgânicos e biocarvões também evidenciou variações para os atributos biológicos do solo, onde o solo com

BP+BCP na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ apresentou maior valor para as atividades enzimáticas da desidrogenase e FDA. Conclui-se, de modo geral, que a aplicabilidade de resíduos no solo é uma prática viável, pois além de proporcionar uma sustentabilidade, por estar dando um destino mais viável e vantajoso para gestão de resíduos, sua aplicação no solo apresentou efeitos positivos em relação a produtividade da *brizantha* cv. Marandu e aos atributos do solo.

Palavras-chave: Condicionador de solos. Biocarvão. Fertilidade do Solo. Biologia do Solo., Produtividade.

ABSTRACT

Interaction between organic residues and nitrogen fertilizing at the cultivate of *Urochloa brizantha* cv. Marandu and at the soil attributes

The biosolid is a residue generated during the treatment of wastewater at the Sewage Treatment Station (ETE), it is rich in organic matter and nutrients, but there are limitations to its use. A viable alternative for using this residue is its transformation into biochar through pyrolysis, associating the inherent benefits to biochar, eliminating the presence of pathogens which is one of the main limitations for its application. Therefore, this study aimed to evaluate whether applications of organic residues and biochars individual or combined with nitrogen fertilization interfere in the soil attributes and in the development of *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Thus, in a first stage, biochars were produced from a dry biosolids sample and a dry sugarcane bagasse sample, separately, through slow pyrolysis at a temperature of 350°C, which were characterized through physical analysis, chemical and mass balance. In a second stage, an experiment was installed in a completely randomized design (DIC), with a 7x4 factorial scheme and 5 repetitions, and the treatments consisted of 7 substrate compositions namely: control soil (SC); soil + 300 g of pure biosolid (BP); soil + 100 g pure sugarcane bagasse (BCP); soil + 150 g pure biosolid + 50 g pure sugarcane bagasse (BP+BCP); soil + biosolid biochar (BB); soil + 100 g sugarcane bagasse biochar (BBC); soil + 150 g biosolid biochar + 50 g sugarcane bagasse biochar (BB+BBC); and 4 doses of mineral nitrogen fertilization: 0; 12,5; 25 and 50 mg dm⁻³. In all, 4 cuts were made in the plants at 60, 88, 116 and 144 days after planting. The development of Marandu grass was evaluated through physiological variables: leaf mass production, root mass production, total nitrogen content and organic carbon in plant tissues. As for the soil, the chemical and microbiological attributes were evaluated after the cultivation of Marandu grass. For this, chemical analyzes (determination of pH, organic matter, phosphorus, potassium, magnesium, calcium, aluminum and hydrogen plus aluminum, N-total, N-inorganic and total organic carbon) and biological (basal soil respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, dehydrogenase enzyme activity and fluorescein diacetate hydrolysis). The data obtained in the experiment were submitted to analysis of variance using the SISVAR program. For comparison of means, the Scott-Knott test at 5% probability was used ($p < 0,05$). In chapter I, after characterization of the materials, it was found that organic residues and biochars present favorable characteristics for agricultural use, mainly BP and BB in terms of fertility, as they showed higher values of nutrients and CTC. BP and BB can be used as a soil corrector, as they have a alkaline pH of 12.02 and 9.64. In chapter II, the application of materials in the soil showed positive effects. Where the soil with insertion of BP at a dose corresponding to 100 kg of N ha⁻¹ showed higher values in relation to the productivity of *Urochloa brizantha* cv. Marandu. And, soils with the addition of BP and BB, individually or combined with ADN, provided an increase in pH, CTC and base saturation. The addition of organic residues and biochars also evidenced variations for the biological attributes of the soil, where the soil with BP+BCP at a dose corresponding to 100 kg of N ha⁻¹ presented higher value for the enzymatic activities of dehydrogenase and FDA. It is concluded, in general, that the applicability of residues in the soil is a viable practice, because in addition to providing sustainability, by providing a more viable and advantageous destination for residue management, its

application in the soil had positive effects in relation to productivity of brizantha cv. Marandu and the attributes of the soil.

Keywords: Soil conditioner. Biochar. Soil Fertility. Soil Biology. Productivity.

LISTA DE SIGLAS

ADN	– Adubação Nitrogenada
BB	– Biocarvão de Biossólido
BBC	– Biocarvão de Bagaço de Cana-de-açúcar
BCP	– Bagaço de Cana-de-açúcar Puro
BMS	– Biomassa Microbiana
BP	– Biossólido Puro
C	– Carbono
CF	– Carbono Fixo
Cmic	– Carbono da Biomassa Microbiana
COTPA	– Carbono Orgânico Total da Parte Aérea
COTPR	– Carbono Orgânico Total da Parte Radicular
CAPES	– Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB	– Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	– Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONAB	– Companhia Nacional de Abastecimento
COT	– Carbono Orgânico Total
EMBRAPA	– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	– Estação de Tratamento de Esgoto
FDA	– Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína
FDAC	– Fibra de Detergente Ácido
FDN	– Fibra de Detergente Neutro
IPEA	– Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MO	– Matéria Orgânica
MOS	– Matéria Orgânica do Solo
MSPA	– Massa Seca da Parte Aérea
MSPR	– Massa Seca da Parte Radicular
MV	– Materiais Voláteis
MVPA	– Massa Verde da Parte Aérea
MVPR	– Massa Seca da Parte Radicular
N	– Nitrogênio
NH ₄ ⁺	– Amônio
Nmic	– Nitrogênio da Biomassa Microbiana
NO ₃ ⁻	– Nitrato
NTPA	– Nitrogênio Total da Parte Aérea

NTPR	– Nitrogênio Total da Parte Radicular
qCO_2	– Quociente Metabólico
$qMic$	– Quociente Microbiano
RG	– Rendimento Gravimétrico
RGLP	– Rendimento Gravimétrico de Licor Pirolenhoso
RGNC	– Rendimento Gravimétrico de Gases Não Condensáveis
SC	– Solo Controle
TC	– Teor de Cinzas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Estação de tratamento de esgoto de Presidente Prudente – SP..	27
Figura 2 -	Fluxograma dos setores do processo de tratamento de lodo ativado.....	28
ARTIGO I		
Figura 1 -	Fluxograma concernente as etapas de produção e caracterização.....	70
Figura 2 -	Processo de secagem do bio sólido.....	71
Figura 3 -	Processo de destorroamento do bio sólido.....	71
Figura 4 -	Acondicionamento de bagaço de cana-de-açúcar em sacos e moagem.....	72
Figura 5 -	Sistema de produção de biocarvões.....	73
Figura 6 -	Matérias-primas e seus respectivos biocarvões.....	74
Figura 7 -	Processos de pesagem dos sólidos e líquidos após pirólise.....	74
Figura 8 -	Procedimento de limpeza dos cadinhos com HCl a 9,5%.....	76
Figura 9 -	Processo de secagem dos cadinhos em dessecador.....	76
Figura 10 -	Balança analítica utilizada para determinação de massa.....	76
Figura 11 -	Processo de secagem para a análise de teor de umidade.....	77
Figura 12 -	Análise de determinação de materiais voláteis.....	78
Figura 13 -	Análise de pH das matérias-primas e seus respectivos biocarvões.....	79
Figura 14 -	Análise de C.E das matérias-primas e seus respectivos biocarvões.....	80
Figura 15 -	Primeira parte da análise de CTC.....	80
Figura 16 -	Segunda parte da análise de CTC.....	81
Figura 17 -	Primeira parte da análise de FDN e FDAC.....	83
Figura 18 -	Segunda parte da análise de FDN e FDAC.....	83
Figura 19 -	Terceira parte da análise de FDAC.....	84
Figura 20 -	Análise de determinação da densidade de partículas dos materiais.....	85
Figura 21 -	Determinação das frações granulométricas dos materiais.....	86

Figura 22 -	Rendimento dos materiais pirolisados a 350°C por 30 minutos.....	88
Figura 23 -	Matriz de correlação de Pearson entre o teor de nutrientes, voláteis, cinzas, carbono fixo e CTC nas matérias-primas e biocarvões	95
Figura 24 -	Análise bromatológica das matérias-primas e biocarvões.....	97
Figura 25 -	Densidade de partículas das matérias-primas e biocarvões.....	99
Figura 26 -	Distribuição do tamanho de partículas das matérias-primas e biocarvões.....	100

ARTIGO II

Figura 1 -	Local de condução do experimento.....	112
Figura 2 -	Fluxograma concernente as etapas de desenvolvimento do projeto.....	113
Figura 3 -	Cronologia de trabalho para a condução do experimento.....	116
Figura 4 -	Período de incubação.....	117
Figura 5 -	Incorporação dos materiais ao solo.....	118
Figura 6 -	Germinação da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	119
Figura 7 -	<i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu após o desbaste.....	120
Figura 8 -	<i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu após o corte de uniformização.....	120
Figura 9 -	Ataque da lagarta na <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	121
Figura 10 -	Ataque de pulgão na <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	121
Figura 11 -	Desenvolvimento da <i>brachiaria</i> antes do 3º corte.....	122
Figura 12 -	Coleta da parte foliar da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	122
Figura 13 -	Coleta de solo.....	123
Figura 14 -	Destorroamento do solo.....	124
Figura 15 -	Digestão e destilação do teor de nitrogênio total nas amostras de solo.....	124
Figura 16 -	Análise de nitrogênio inorgânico (NH ₄ ⁺ e NO ₃ ⁻).....	125
Figura 17 -	Leitura do teor de matéria orgânica do solo.....	126
Figura 18 -	Análise de respiração do solo.....	127
Figura 19 -	Processo de extração e filtração de solo.....	128
Figura 20 -	Análise de carbono da biomassa microbiana do solo.....	128

Figura 21 -	Análise de nitrogênio da biomassa microbiana do solo.....	130
Figura 22 -	Análise da atividade da enzima desidrogenase do solo.....	131
Figura 23 -	Análise de FDA.....	132
Figura 24 -	Secagem das amostras para determinação da massa seca.....	133
Figura 25 -	Parte da análise de nitrogênio total radicular.....	134
Figura 26 -	Matriz de correlação de Pearson dos atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas.....	148
Figura 27 -	Análise de componentes principais das variáveis químicas de solo sob influência de resíduos orgânicos e biocarvões sem adubação nitrogenada.....	150
Figura 28 -	Gráficos de contribuição das variáveis químicas do solo nas dimensões.....	150
Figura 29 -	Matriz de correlação de Pearson dos atributos químicos e biológicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões.....	167
Figura 30 -	Gráfico de regressão linear da produtividade do 1º, 2º e 3º corte em função da adubação nitrogenada.....	173
Figura 31 -	Matriz de correlação de Pearson da produtividade da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu e atributos químicos e biológicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões.....	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química geral do lodo conforme o tratamento adotado.....	29
Tabela 2 - Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas em lodo de esgoto ou produtos derivados.....	31
Tabela 3 - Concentração de agentes patogênicos em classes de lodo de esgoto ou produtos derivados.....	31
Tabela 4 - Benefícios de propriedades específicas do biocarvão.....	36

ARTIGO I

Tabela 1 - Proporção relativa dos componentes nas matérias-primas e seus respectivos biocarvões.....	90
Tabela 2 - Valores de pH, matéria orgânica, carbono orgânico, nitrogênio total, relação C/N, condutividade elétrica e capacidade de troca catiônica nas matérias-primas e seus respectivos biocarvões.....	92
Tabela 3 - Valores dos nutrientes nas matérias-primas e seus respectivos biocarvões.....	94
Tabela 4 - Valores de elementos químicos presentes nos materiais (%).....	96

ARTIGO II

Tabela 1 - Análise física do solo antecedente a instalação do experimento.....	114
Tabela 2 - Análise química do solo antecedente a instalação do experimento.....	114
Tabela 3 - Delineamento experimental do projeto.....	115
Tabela 4 - Atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubação nitrogenada.....	141
Tabela 5 - Micronutrientes em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas.....	145
Tabela 6 - Valores de nitrogênio total, amônio, nitrato, carbono orgânico total e relação C/N em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubação nitrogenada.....	155

Tabela 7 - Respiração, C_{mic} , q_{mic} , qCO_2 , N_{mic} , desidrogenase e FDA em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões.....	163
Tabela 8 - Valores de massa verde e massa seca da parte aérea do 1°, 2° e 3° corte da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	169
Tabela 9 - Valores de massa seca da parte radicular da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	178
Tabela 10 - Valores de carbono orgânico, nitrogênio total e relação C/N da parte aérea do 1°, 2° e 3° corte da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	183
Tabela 11 - Valores de carbono orgânico, nitrogênio total e relação C/N da parte radicular da <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	185

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	21
1.1	Justificativa.....	24
2	OBJETIVOS	25
2.1	Objetivo geral	25
2.2	Objetivos específicos.....	25
3	REVISÃO DE LITERATURA	26
3.1	Biossólido	26
3.1.1	<i>Composição química, destinação e legislação aplicada ao uso de biossólido</i>	29
3.1.1.1	<i>Composição química</i>	29
3.1.1.2	<i>Destinação do biossólido.....</i>	30
3.1.1.3	<i>Legislação aplicada ao uso do biossólido</i>	31
3.1.2	<i>Uso de biossólido na produção agrícola e nos atributos do solo.....</i>	32
3.2	Biocarvão	35
3.2.1	<i>Biocarvão de biossólido.....</i>	39
3.2.1.1	<i>Biocarvão de biossólido na produção agrícola e nos atributos do solo</i>	41
3.2.2	<i>Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar</i>	44
3.3	Nitrogênio	46
3.4	<i>Urochloa brizantha cv. Marandu</i>	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	ARTIGO I: RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCÁRVÕES PARA FINS DE CONDICIONANTE DE SOLOS	66
	ARTIGO II : CULTIVO DA UROCHLOA BRIZANTHA CV. MARANDU E ATRIBUTOS DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ADUBAÇÃO NITROGENADA.....	108

1 INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional traz diversos problemas ao meio ambiente, desde a utilização intensiva dos recursos naturais para produção de bens de consumo até a intensificação na produção de resíduos, pois a geração de resíduos e subprodutos é inerente a qualquer setor produtivo (CUBA; GUIMARÃES; TERÁN, 2018).

Um exemplo relacionado a utilização intensiva de recursos naturais vem a ser a intensificação da atividade agrícola para suprir a nova demanda de alimentos necessários para a população. Pois são utilizados sistemas intensivos e convencionais de produção que tornam-se insustentáveis ao decorrer do tempo, causando a degradação do solo, em razão da grande quantidade de nutrientes que são extraídos pelas culturas (JOSEPH *et al.*, 2007).

Na região do Oeste Paulista, por exemplo, tem predominância de monocultivo, principalmente pastagens. A *Urochloa brizantha* cv. Marandu destaca-se na região por apresentar uma boa adaptação em condições climáticas, pedológicas e hídricas adversas, possui elevado potencial de produção de forragem em solos férteis ou corrigidos com adubação apropriada (SOARES FILHO, 1994).

Essa região tem predomínio de Argissolos, seguido de Latossolos e uma área menor de Neossolos, normalmente com textura média arenosa (OLIVEIRA *et al.*, 1999; CORDEIRO *et al.*, 2020), esses apresentam limitações para o cultivo de plantas, podendo ser considerados como de baixa fertilidade natural, isso pode estar relacionado aos baixos teores de matéria orgânica, sendo mais suscetíveis também a degradação.

Desta forma, torna-se importante o desenvolvimento e implementação de tecnologias de aproveitamento de resíduos, sendo que a utilização de recursos subaproveitados ou inaproveitados resultantes das atividades antrópicas constitui uma prática relevante inserida dentro de um contexto baseado em princípios sustentáveis (FARIAS *et al.*, 2013).

A adição de resíduo no solo é uma prática agrícola muito utilizada, tendo por finalidade melhorar a qualidade do solo (CARVALHO *et al.*, 2015). Dentre os resíduos, o biossólido da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) destaca-se, visto que, cresce na medida em que se aumenta a demanda populacional. É um material rico em matéria orgânica e apresenta ainda em sua constituição quantidades significativas de

nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, sendo o nitrogênio e o fósforo os que normalmente se apresentam em maior quantidade (PEDROSA *et al.*, 2017). Por apresentar um potencial de utilização para fins produtivos, uma vez higienizado, estabilizado e seco, passa a ser denominado biossólido (MARQUES, 1990; MARQUES *et al.*, 2002).

Uma possível alternativa viável para tentar solucionar ambos os problemas gerados pelo crescimento populacional, tanto do biossólido quanto da degradação do solo devido à intensificação agrícola, seria a utilização do biossólido como condicionador de solos (SANTOS *et al.*, 2011). Condicionador de solos vem a ser um produto que promove a melhoria dos atributos físico, químicos ou atividade biológica do solo, podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente (BRASIL, 2006a).

Essa prática de disposição é considerada uma alternativa promissora, visto que há várias possibilidades de uso na agricultura, silvicultura e na recuperação de solos degradados, entre outros destinos. O uso do biossólido na agricultura tem sido uma solução viável do ponto de vista agrônomo e econômico (NASCIMENTO *et al.*, 2011; MAIO *et al.*, 2011).

Segundo Nascimento *et al.* (2011) quando a aplicação usufrui das propriedades do produto como condicionador ou fertilizante, fornece macro e micronutrientes melhorando os atributos em solos degradados e com isso benefícios na agricultura têm sido observados em diversas culturas, como fonte nutricional e na melhoria dos atributos do solo.

No entanto a utilização do biossólido na agricultura tem limitações de uso para algumas culturas, pois segundo a Resolução Federal CONAMA nº 375 de 2006 (BRASIL, 2006) o lodo possui em sua composição diferentes concentrações de componentes contaminantes, tais como: metais tóxicos, microrganismos patogênicos e componentes orgânicos tóxicos (hidrocarbonetos aromáticos). E, caso as concentrações de lodo sejam manejadas inadequadamente pode ocorrer à contaminação do solo e da água e, conseqüentemente possíveis riscos à saúde humana (ZIELINSKA *et al.*, 2015).

Uma alternativa viável para atender as exigências da legislação brasileira e evitar possíveis riscos de contaminação, seria a transformação do material gerado na ETE em biocarvão através de um procedimento térmico: a pirólise. Que consiste na queima do material na ausência total ou parcial do oxigênio, ou seja, uma

decomposição pelo calor ou degradação de um material por energia térmica em ambiente de temperatura controlada, variando de 300°C a 800°C (NOVOTNY *et al.*, 2015). Esse processo promove a eliminação de patógenos e componentes orgânicos perigosos, destacando-se por possibilitar a transformação desse resíduo orgânico em biocarvão e, dessa forma permitindo a sua utilização na agricultura, reduzindo os riscos ambientais (SILVÉRIO; BARBOSA, 2008; CABALLERO *et al.*, 1997).

O termo biocarvão foi idealizado a partir da observação e conhecimento da denominada Terra Preta de Índio da Região Amazônica no Brasil e refere-se a um material sólido, rico em carbono (LEHMANN; JOSEPH, 2009; ZELAYA *et al.*, 2019). O biocarvão pode ser empregado como condicionador de solo e fonte de nutrientes para plantas (NOVOTNY *et al.*, 2015). Porém suas propriedades são dependentes da matéria-prima e temperatura utilizadas para a sua produção.

As matérias-primas usadas para produzir biocarvão são divididas em duas categorias: Nutricional, que tem um forte potencial para fornecer um efeito fertilizante e; Estrutural, que pode fornecer um efeito estrutural ao solo (JEFFERY *et al.*, 2017), isto é, aumentar a retenção de água, diminuir a densidade do solo ou fornecer refúgio para organismos do solo (WARNOCK *et al.*, 2007; LEHMANN *et al.*, 2011). Desta forma se fazem necessários estudos da mistura de matrizes residuais de ampla contribuição orgânica como o bagaço de cana-de-açúcar, subproduto da indústria açucareira, com outras que apresentam potencial de contaminação ambiental (biossólido), a fim de melhorar a composição química do biocarvão e diminuir riscos de poluição.

A aplicação do biocarvão ao solo é benéfica, pois através de sua incorporação pode ocorrer à diminuição da biodisponibilidade de metais tóxicos, proporcionando melhorias nas propriedades químicas e na fertilidade do solo podendo ainda aumentar o crescimento e o rendimento das culturas. Pode ainda diminuir as perdas de nutrientes aplicados ao solo, viabilizar o uso do biossólido na agricultura e aumentar o sequestro de carbono no solo (HOSSAIN *et al.*, 2010; LIU; LIU; ZHANG, 2014; SONG *et al.*, 2014).

No biocarvão encontram-se presentes vários elementos importantes para as culturas, tais como N, P, Ca e Mg, sendo que o N é considerado um dos elementos essenciais para o crescimento das plantas (HOSSAIN *et al.*, 2011).

A inserção de resíduos orgânicos no solo proporciona a liberação gradual dos nutrientes à planta (SOARES *et al.*, 2005) e pode trazer benefícios positivos nos

atributos químicos, físicos e biológicos do solo propiciando condições adequadas para o crescimento, o desenvolvimento das plantas e para a manutenção da diversidade de organismos que habitam no solo (DORAN; PARKIN, 1994).

Neste sentido, o presente estudo visa que o emprego de resíduos orgânicos e biocarvões individuais ou combinados com adubação nitrogenada possa contribuir, de forma benéfica, nos atributos químicos e biológicos do solo como também no desenvolvimento da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Buscando desta forma a aplicação da sustentabilidade por meio do aproveitamento de resíduos.

1.1 Justificativa

O biossólido é um resíduo gerado na ETE, após o tratamento das águas residuárias. Normalmente é acomodado em grandes áreas na própria ETE ou em aterros sanitários, o que demanda custos e inutilização de grandes áreas. Já o bagaço de cana-de-açúcar é um dos maiores resíduos gerados no setor agroindustrial brasileiro. Com intuito de buscar um destino sustentável para o biossólido e, uma nova forma de reaproveitamento para o bagaço de cana-de-açúcar ambos foram incluídos como matérias-primas no presente estudo. Pois, a sociedade carece de soluções práticas para vários problemas ambientais existentes no espaço urbano e rural.

A região do Oeste Paulista é caracterizada por solos com várias limitações como: baixa fertilidade natural, acidez elevada e baixo teor de matéria orgânica. Com isso, tornam-se importantes estudos que busquem uma maneira segura e viável do aproveitamento desses resíduos. Sendo que, o biossólido, por exemplo, é um resíduo rico em matéria orgânica e possui ainda em sua composição alguns nutrientes essenciais as plantas, podendo ser utilizado como condicionador de solos, principalmente em áreas degradadas, de maneira que isso possa representar ganhos econômicos, sociais e ambientais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar se aplicações de resíduos orgânicos e biocarvões, individuais ou combinados com adubação nitrogenada, interferem nos atributos do solo e no desenvolvimento da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

2.2 Objetivos específicos

- Produzir e caracterizar os biocarvões por meio dos parâmetros físico-químicos;
- Avaliar o efeito da aplicação de resíduos orgânicos e biocarvões na determinação de massa seca e, na concentração de N e Carbono Orgânico presente na parte aérea e radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu;
- Avaliar o efeito da aplicação de resíduos orgânicos e biocarvões nos atributos químicos e biológicos do solo;
- Avaliar o potencial de uso dos resíduos orgânicos e biocarvões para uma produção mais sustentável.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Biossólido

O termo esgoto é empregado para caracterizar os efluentes provenientes do uso doméstico, comercial, hospitalar, industrial, de áreas agrícolas, dentre outros. Pode-se levar em consideração para a estimativa da produção de esgoto: a população contribuinte, o tipo e tamanho da rede coletora, sendo que este consumo pode variar ainda em relação ao dia, hora, estação do ano e de acordo com o ciclo natural das atividades humanas (PHILIPPI JR; MALHEIROS, 2005; VON SPERLING, 2005).

A falta de tratamento das águas residuárias traz uma abordagem séria a problemática ambiental, visto que os corpos d'água são impactados negativamente com a redução do nível de oxigênio, morte da vida aquática, perda da qualidade da água e assoreamento nos leitos de rios gerando problemas sociais e ambientais. Desta forma o tratamento do esgoto tem como principal objetivo a correção de “algumas características indesejáveis pela redução de sólidos em suspensão, material orgânico, nutrientes e organismos patogênicos, para possível reutilização ou destinação final” (VAN-HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Com foco no município de Presidente Prudente - SP, o qual possui uma área territorial de 560,637 km² e 230.371 habitantes (IBGE, 2020), a SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo é a responsável pela coleta e tratamento da rede de esgoto.

A ETE do município de Presidente Prudente-SP (Figura 1) está inserida na bacia do córrego do Limoeiro, localizada a 800 metros aproximadamente do km 8 da Rodovia Júlio Budiski, a estação possui cerca de 162.000 m², com potência instalada de 1.726 kW, seu funcionamento é de 24 h/dia e o processo de tratamento utilizado é o de lodo ativado (BARROS; LEAL; PINTO, 2007; BEGA *et al.* 2019).

Figura 1 – Estação de tratamento de esgoto de Presidente Prudente – SP



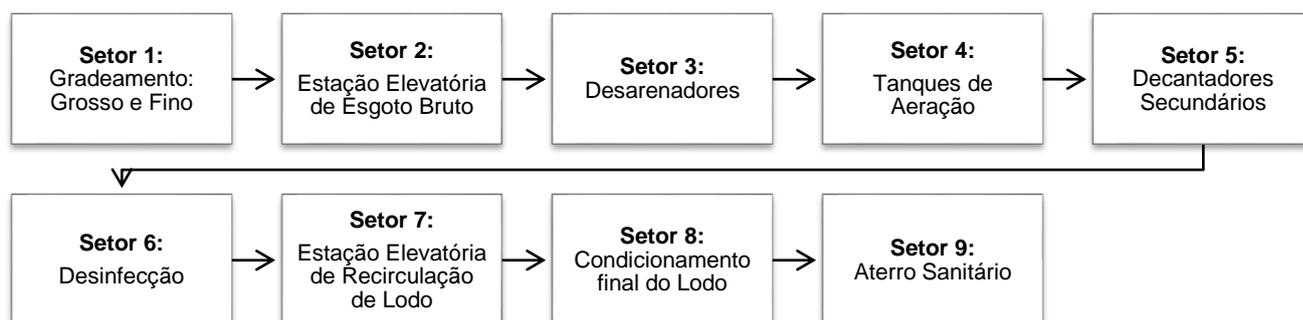
Fonte: Bega *et al.* (2019)

O sistema de lodo ativado vem sendo amplamente utilizado para tratamento de efluentes domésticos e industriais (VON SPERLING, 1997). O uso de sistemas convencionais de lodo ativado fora adotado a partir da década de 1930 para o tratamento de efluentes. Os microrganismos presentes nesse processo, bactérias e protozoários, possuem capacidade de reciclar alguns elementos como carbono, nitrogênio e fósforo, podendo degradar também diversas substâncias orgânicas (VANYSACKER *et al.*, 2014).

De acordo com Von Sperling (1997), no processo de tratamento por lodo ativado têm-se a remoção da matéria orgânica por meio dos microrganismos que se desenvolvem dispersos em tanque de aeração. Esses microrganismos do tanque de aeração sedimentam em um decantador secundário, de modo que o efluente saia clarificado para o corpo receptor. O lodo gerado se sedimenta no fundo do decantador e, é retornado por bombeamento ao tanque de aeração, isso faz com que aumente a eficácia do sistema.

Na Figura 2 estão presentes os setores diferenciados do processo de tratamento de lodo ativado que ocorrem na ETE do município de Presidente Prudente - SP.

Figura 2 – Fluxograma dos setores do processo de tratamento de esgoto



Fonte: A autora.

Esse tratamento além de reduzir a carga poluidora presente nas águas residuais produz um resíduo denominado lodo de esgoto. Na ETE do município de Presidente Prudente, esse resíduo é acondicionado em geotubes (também conhecidos por bag's) dispostos sob o solo impermeabilizado com lona plástica, manta de bidín e pedras britadas, ficando assim expostos ao meio para que seja drenado através de pequenos poros no tecido, resultando em uma desidratação e uma eficiente redução no volume de água (BARROS; LEAL; PINTO, 2007).

O lodo é disposto em aterro sanitário, sendo que o último é composto por duas câmaras, onde uma é utilizada para a disposição em bag e, a outra para receber o lodo misturado com cal (BEGA *et al.* 2019). Quando tratado e processado o lodo recebe o nome de biossólido (BARBOSA; FILHO, 2006).

Com base em um dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), que visa a “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”, tendo por instrumento a pesquisa científica e tecnológica, têm-se buscado soluções viáveis para o reaproveitamento do biossólido - resíduo gerado em grandes quantidades nos centros urbanos. De forma que possa ser utilizado em linhas de pesquisas voltadas para áreas ambientais e agrônômicas, visto que, o biossólido apresenta um potencial para o emprego como condicionador de solos por ser um resíduo rico em matéria orgânica e alguns nutrientes, podendo contribuir para melhoria dos atributos de solos degradados.

3.1.1 Composição química, destinação e legislação aplicada ao uso de biossólido

3.1.1.1 Composição química

Na composição química do biossólido podem ocorrer variações de acordo com o local de origem, residencial ou industrial, período do ano e o sistema de tratamento empregado. O biossólido típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo, demais macro e micronutrientes, além de alguns elementos tóxicos (MELO; MARQUES, 2000; BETTIOL; CAMARGO, 2006), constituído por 99,9% de água e apenas 0,1 % de sólidos, sendo que cerca de 75% desses sólidos, são constituídos de matéria orgânica em processo de decomposição (NUVOLARI, 2003).

A origem do biossólido diferencia sua composição em relação às diferentes concentrações de nutrientes presentes, sendo assim é necessária a caracterização deste tipo de resíduo, como procedimento básico para escolha da alternativa de tratamento. Malavolta, Gomes e Alcarde (2000, p.60) mencionam que:

Existem vários tipos de lodo de esgoto, lama ou resíduos orgânicos que podem ser produzidos e, dependem do método de tratamento do esgoto: lodo sedimentoso, resultado da deposição simples; lodo digerido, resultando a decomposição anaeróbica do sedimentado; lodo ativado, produzido por um tratamento aeróbico especial rápido e deposição de materiais em suspensão; lodo ativado e digerido; lodo precipitado quimicamente.

A Tabela 1 apresenta a composição química do biossólido de acordo com a forma de tratamento escolhida.

Tabela 1 – Composição química do lodo conforme o tratamento adotado

Características	Lodo não tratado		Lodo Digerido		Lodo Ativado
	Faixa	Valor típico	Faixa	Valor típico	Faixa
Sólidos Secos Total (ST) %	2,0-8,0	5,0	6,0-12,0	10,0	0,8-1,2
Sólidos Voláteis (% ST)	60-80	65,0	30-60	40,0	59-88
Proteína (% ST)	20,0-30,0	25,0	15,0-20,0	18,0	32,0-41,0
Nitrogênio (N % ST)	1,5-4,0	2,5	1,6-6,0	3,0	2,4-5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ % ST)	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11,0
Potássio (K ₂ %ST)	0,0-1,0	0,4	0,0-3,0	1,0	0,5-0,7
Celulose (%ST)	8,0-15,0	10,0	8,0-15,0	10,0	-
Sílica (SiO ₂ , % de ST)	15-20	-	10-20	-	-
pH	5,0-8,0	6,0	6,5-7,5	7,0	6,5-8,0

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (1991). ST: Sólidos Totais.

O pH do biossólido predominante situa-se na faixa 6,0 e 7,0, sendo que a maioria dos lodos desidratados parcialmente apresentam em torno de 60 a 70% de sólidos e, a maior parte vem a ser de matéria orgânica, contendo um teor que varia de 70 a 600 g kg⁻¹ (SHUMAN, 1998). Tendo uma importância muito grande, no quesito fertilidade do solo, devido a sua relação com a disponibilidade ou indisponibilidade de elementos químicos, nutrientes ou não, as plantas. Esse pH do resíduo pode variar de acordo com a textura, capacidade tamponante do solo e o tratamento que o biossólido recebeu (OLIVEIRA *et al.*, 2002).

O aumento do pH do solo favorece a atividade microbiana, aumenta a mineralização da matéria orgânica aumentando dessa forma a disponibilidade de micronutrientes (LUCHESE; FAVERO; LENZI, 2002). Ainda em relação a esse parâmetro pode-se afirmar que a alcalinidade é um fator de suma importância por estar diretamente ligado a inativação de microrganismo no lodo (BARROS; COSTA; ANDREOLI, 2006).

Outro parâmetro importante é a análise dos sólidos, pois através dos sólidos totais e sólidos totais voláteis monitoram-se o grau de estabilização da matéria orgânica.

3.1.1.2 Destinação do biossólido

Há várias alternativas para a destinação do biossólido, sendo que as de menores impactos ajudam na redução dos resíduos e aumenta a reciclagem e compostagem (BRASIL, 2010) como por exemplo a recuperação de áreas degradadas e reciclagem agrícola (TSUTIYA, 2000).

Dentre as diferentes práticas de disposição de lodo no solo podem ser divididas em uso benéfico, quando a aplicação beneficiar-se das propriedades do produto como fertilizante dos solos; e descarte, quando as práticas utilizam-no como local de estocagem (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

3.1.1.3 Legislação aplicada ao uso do biossólido

A reciclagem do biossólido no meio ambiente pode apresentar riscos, visto que apresenta metais tóxicos (Tabela 2) e microrganismos patogênicos (Tabela 3) em sua composição, devido a isso há uma Resolução Federal do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 375 de 2006 vigente na qual define os critérios e procedimentos para sua utilização.

Tabela 2 – Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas em lodo de esgoto ou produtos derivados

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida (mg kg ⁻¹ , base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: Brasil (2006).

Tabela 3 – Concentração de agentes patogênicos em classes de lodo de esgoto ou produtos derivados

Classe	Concentração de patógenos ⁽¹⁾
A	Coliformes Termotolerantes < 10 ³ NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g de ST
	<i>Salmonella</i> : ausência em 10 g de ST
	Vírus < 0,25 < 0,25 UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes Termotolerantes < 10 ⁶ NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g de ST

Fonte: Brasil (2006). Nota: ⁽¹⁾ ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa.

A Resolução Federal CONAMA n° 375 de 2006 menciona que toda aplicação do biossólido e produtos derivados em solos agrícolas deve ser obrigatoriamente condicionada à elaboração de um projeto agrônômico para as áreas de aplicação, o responsável deve ser um profissional devidamente habilitado atendendo aos critérios e procedimentos estabelecidos.

A base para aplicação do lodo de esgoto tratado pela ETE deve estar ligada diretamente aos atributos do solo e não somente aos teores de metais no biossólido, pois o conhecimento de como esses atributos influenciam no comportamento dos metais, ajudariam a demonstrar a quantidade de resíduo que um solo possa receber (BORGES; COUTINHO, 2004). Há também uma norma técnica da CETESB, P.4.230/99, em forma de um manual técnico com critérios para projeto e operação da aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas (SÃO PAULO, 1999).

O biossólido vem de forma progressiva mostrando-se um importante insumo agrícola, de interesse na recuperação de solos degradados bem como na fertilização das culturas, de preferência aquelas que não são de consumo direto pelos seres humanos. Contudo é fundamental o conhecimento da composição do lodo, com intuito de se calcular as quantidades adequadas a serem incorporadas ao solo conforme consta na Resolução Federal CONAMA 375 de 2006, de forma a evitar riscos de contaminação ao ambiente.

As dosagens de aplicações do biossólido no solo devem ser feitas de forma controlada, pois no caso de dosagens elevadas, o solo juntamente com as águas superficiais poderão ser impactados negativamente (EMBRAPA, 2007; FERNANDES; SILVA, 1999), porém quando a aplicação ocorrer obedecendo os critérios fixados para o seu uso, não traz prejuízos à saúde e nem ao meio ambiente (TSUTYA, 2000).

3.1.2 Uso de biossólido na produção agrícola e nos atributos do solo

A viabilidade do lodo visa à reciclagem desse biossólido como forma de reaproveitamento econômico, desse ponto de vista, o uso do lodo como fertilizante orgânico, representa o reaproveitamento integral de seus nutrientes (macro e micro) e a substituição de adubação química, com rendimentos equivalentes ou superiores aos conseguidos com fertilizantes minerais (KOCSSIS; MARIA, 2004). Ainda é

considerada uma alternativa de destino viável, como corretor de pH, principalmente, para os carbonatos precipitados em estações de abrandamento a cal e soda (RICHTER, 2001).

Os efeitos da aplicação trazem resultados positivos na recuperação dos atributos do solo e na busca por técnicas que possam ajudar na recuperação de ecossistemas, principalmente aqueles com dificuldade de retornar ao seu estado original (LOPES; QUEIROZ, 1994), como geram um aumento na quantidade de nutrientes do solo e nas características de fertilidade (FARIA; SANTOS, 2007).

O biossólido ainda pode ser utilizado como complemento da adubação, reduzindo assim o uso de fertilizantes químicos e conseqüentemente reduzindo o custo, proporcionando um rápido crescimento das plantas, melhorando a porcentagem da cobertura vegetal, maiores produtividades e melhor desenvolvimento do sistema radicular, após a reestruturação dessas áreas (BARBOSA; FILHO, 2006), prevenindo ou reduzindo o encrostamento do solo, que ocorre devido à adição de matéria orgânica (PAGLIAI; VIGNOZZI, 1998).

A matéria orgânica presente no lodo de esgoto ajuda na agregação das partículas do solo, diminuindo a densidade do solo, aumentando a aeração, melhorando a infiltração e retenção de água. A composição química do biossólido é de suma importância na recomendação da quantidade aplicada ao solo, principalmente, devido ao seu potencial de fertilização. Este potencial é dado pela presença de macronutrientes como N, P e K (MELO; MARQUES, 2000; SILVA *et al.*, 2008).

O lodo de esgoto pode fornecer às plantas, quantidades satisfatórias de nutrientes essenciais, exceto o potássio e o boro, para culturas como: Pinus, milho, arroz, feijão, trigo, soja, sorgo, pastagens e cana-de-açúcar (SKORUPA *et al.*, 2006).

As práticas de disposição do lodo são benéficas, quando a aplicação se usufruir das propriedades do produto como condicionador, o que fornece macro e micronutrientes melhorando a característica em solos degradados, podendo contribuir ainda para a melhoria de pH e incitar a atividade microbiana na área (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

A matéria orgânica influencia na agregação do solo, é um processo dinâmico, sendo necessário o acréscimo contínuo de material orgânico para manter a estrutura adequada ao desenvolvimento das plantas, melhorando as características físicas do solo, agindo como um agente cimentante promovendo assim a agregação de suas

partículas e aumentando a capacidade de retenção de água. Dessa forma, as propriedades do bio sólido, o tornam interessante para aplicação em solos agrícolas desgastados por manejo inadequado, bem como para recuperação de áreas degradadas, o lodo ainda beneficia o solo, pois o torna mais resistente a processos que geram impacto ambiental, como à erosão (KOCSSIS; MARIA, 2004).

O uso de lodo proporciona um maior crescimento das plantas (CAMPOS; ALVES, 2008), ele é benéfico por possuir nutrientes essenciais para a recuperação do solo, sendo rico em matéria orgânica, melhorando sua estrutura. Esse lodo recebe o nome de bio sólido, quando tratado e processado, o que permite o seu manejo em solo agrícola, de maneira racional e ambientalmente segura (BARBOSA; FILHO, 2006).

Já em relação aos atributos químicos do solo, Melo *et al.* (1994) mencionam que a aplicação do bio sólido causa aumento no teor de matéria orgânica, melhorando o nível de fertilidade, promovendo aumento do pH, diminuição da acidez potencial e aumento gradual na disponibilidade de nutrientes como Ca, Mg e S.

A mineralização da matéria orgânica do solo, da qual fazem parte as reações de amonificação e nitrificação, transformam, em média de 2% a 5% do N orgânico por ano, processo que pode ser influenciado pelo uso e manejo do solo, como nas áreas com pastagens, nas quais a forma amoniacal é favorecida por substâncias excretadas pelas raízes das gramíneas, que inibem a nitrificação e, pela existência de menores valores de pH, que ocorrem geralmente nessas condições (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002).

A cobertura vegetal e a adição de resíduos, além de favorecer a atividade de organismos é responsável pelo aporte de matéria orgânica ao solo que, por meio de sua mineralização, concorre para maior disponibilidade de nutrientes para as plantas. A matéria orgânica é o principal componente de retorno de C ao solo, sendo, portanto, de grande relevância na ciclagem de nutrientes e de carbono. Sua taxa de decomposição depende, entre outros fatores, da qualidade do material, sendo o teor de lignina um aspecto importante (RUIVO; BARROS; SCHAEFER, 2006).

A manutenção da produtividade dos ecossistemas agrícolas depende, em grande parte, do processo de transformação da matéria orgânica e, por conseguinte, da biomassa microbiana do solo. A biomassa microbiana do solo possui um papel fundamental na produtividade e na manutenção de ecossistemas, pois atua como um catalisador, das importantes transformações químicas no solo e constitui um

reservatório de nutrientes disponíveis às plantas, devido pertencer ao componente lábil da matéria orgânica do solo e possuir atividade influenciada pelas condições bióticas e abióticas. O seu acompanhamento reflete possíveis modificações no solo, podendo ser considerada um bom indicador das alterações resultantes do manejo (SOUZA *et al.*, 2006).

A biomassa microbiana também representa o compartimento central do ciclo do C, N, P e S no solo e pode funcionar como compartimento de reserva desses nutrientes ou como catalisador na decomposição da matéria orgânica. Assim, além dos fatores de ambiente, a quantidade e a qualidade dos resíduos depositados sobre o solo podem alterar consideravelmente a atividade e a biomassa microbiana do solo (SOUZA *et al.*, 2010).

3.2 Biocarvão

Descobertas na Amazônia, em meados de 1870, as terras pretas são manchas de solo escuro e fértil, diferentes dos solos pobres existentes em quase toda a região (MANGRICH *et al.*, 2011). Associadas às ocupações indígenas, identificadas por fragmentos de cerâmica, ossos, artefatos e outros vestígios incorporados a matriz do horizonte superficial, estes solos alterados pelo homem pré-colombiano tem origem datada entre 500 a 2500 anos atrás e apresentam áreas de menos de um hectare à quilômetros quadrados de extensão (WOODS; GLASSER, 2004).

As terras pretas de índios ou terra escura antropogênica da Amazônia (MADARI; MAIA; NOVOTNY, 2012) inspiraram os pesquisadores a estudarem e produzirem o biocarvão, como material com propriedades edáficas similares, devido à sua alta fertilidade e capacidade de reter carbono, evitando que seja liberado para a atmosfera (MANGRICH *et al.*, 2011), além do alto teor de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio (CUNHA *et al.*, 2009).

Rezende *et al.* (2011) mencionam que a transformação de resíduos orgânicos em biocarvão é uma alternativa para o melhoramento de solos, incremento da produtividade agrícola, sequestro de carbono e produção de energia limpa, sendo que a mesma é considerada uma tecnologia viável para a diminuição do aquecimento global (FOX; CHAPMAN, 2011).

Segundo Zhao, Enders e Lehmann (2014) o biocarvão é um produto sólido derivado da biomassa pirolisada – em condições específicas de temperatura e pressão, que tem o potencial para melhorar as funções do solo, tais como a infiltração de água e a retenção de nutrientes (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; NOVAK *et al.*, 2009; LAIRD *et al.*, 2010). Novotny *et al.* (2015) mencionam que para obter um rendimento de biocarvão aproximado de 20 a 40%, a mais indicada é a pirólise lenta com uma faixa de temperatura mais baixa (300°C a 600°C).

Tem sido demonstrado que alguns biocarvões reduzem a lixiviação de nutrientes, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes para o crescimento da biomassa (NOVAK *et al.*, 2009; LAIRD *et al.*, 2010; MULLEN *et al.*, 2010). O biocarvão alcalino pode melhorar os solos tropicais ácidos e, assim, melhorar a produção de biomassa (CHAN *et al.*, 2007; CHAN *et al.*, 2008). Hossain *et al.* (2011) mencionam que no biocarvão encontram-se presentes vários elementos importantes para as culturas, tais como N, P, Ca e Mg, além de micronutrientes como Fe, S, Cu e Zn. A Tabela 4 traz alguns benefícios agrônômicos e ambientais da aplicação do biocarvão.

Tabela 4 – Benefícios de propriedades específicas do biocarvão

(continua)

Propriedades do biocarvão	Benefícios agrônômicos e ambientais
Produção [%]	O rendimento reflete a quantidade de material de biocarvão produzido a partir do processo de pirólise.
Matéria Volátil [%]	A matéria volátil afeta a longevidade do biocarvão no solo (LEHMANN <i>et al.</i> , 2011; ENDERS <i>et al.</i> , 2012). Voláteis residuais também podem afetar a sorção de substâncias orgânicas bloqueando os poros e alterando as interações químicas de superfície (SANDER; PIGNATELLO, 2005, ZHU; KWON; PIGNATELLO, 2005, NOVAK; BUSSCHER, 2013).
Cinza [%]	A cinza pode melhorar a capacidade de sorção do biocarvão para compostos orgânicos e metais (CAO <i>et al.</i> , 2011).

Tabela 4 – Benefícios de propriedades específicas do biocarvão

(continuação)

Propriedades do biocarvão	Benefícios agronômicos e ambientais
Carbono Fixo [%]	O carbono fixo é não-lábil e, portanto, é uma propriedade atribuída à estabilidade do biocarvão (KEILUWEIT <i>et al.</i> , 2010; ENDERS <i>et al.</i> , 2012; RAJKOVICH <i>et al.</i> , 2012).
pH _w [-]	O pH da solução do solo afeta diretamente a carga superficial do solo, que determina o tipo de nutrientes trocáveis e os íons minerais que ele atrai (MUKHERJEE; ZIMMERMAN; HARRIS, 2011). Além disso, a capacidade tamponante do biocarvão pode neutralizar solos ácidos, reduzir a toxicidade do alumínio e alterar a estrutura da comunidade microbiana do solo (ABE, 1988; LEHMANN <i>et al.</i> , 2011).
Condutividade elétrica [mS m ⁻¹]	A condutividade elétrica indica a quantidade de sal contida no biocarvão. Alta CE pode estabilizar a estrutura do solo (JOSEPH <i>et al.</i> , 2009; HOSSAIN <i>et al.</i> , 2011).
C [mg g ⁻¹]	O carbono total na matéria orgânica beneficia o solo.
N [mg g ⁻¹]	O nitrogênio total no biocarvão fornece macronutriente, mas sua disponibilidade é limitada. O biocarvão pode sorver fortemente a amônia e atuar como uma alteração do solo rica em nitrogênio (SPOKAS; NOVAK; VENTEREA, 2012).
C: N [-]	A relação carbono-nitrogênio influencia a taxa de decomposição da matéria orgânica e a liberação de nitrogênio no solo (NOVAK <i>et al.</i> , 2009).
Capacidade de troca de cátion [Av (mmol _c kg ⁻¹)]	O aumento da capacidade de troca de cátions pode melhorar a capacidade do solo de manter e trocar os cátions (CHAPMAN, 1965; GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002).
P, S [Total (mg kg ⁻¹)]	Macronutrientes fornecidos pelo biocarvão, que podem melhorar a fertilidade do solo.

Tabela 4 – Benefícios de propriedades específicas do biocarvão

(conclusão)

Propriedades do biocarvão	Benefícios agrônômicos e ambientais
Ca, K, Mg, Na, Fe, Mn, Zn [Total (mg kg ⁻¹)]	Micronutrientes fornecidos pelo biocarvão, que podem melhorar a fertilidade do solo.
Área superficial específica (N ₂), Área superficial específica (CO ₂) [m ² g ⁻¹]	A área superficial específica de alto nanoporos e microporos, respectivamente, pode aumentar a afinidade de sorção de compostos orgânicos para biochar (CORNELISSEN <i>et al.</i> , 2005 ; BEESLEY <i>et al.</i> , 2011) e melhorar a capacidade de retenção de água (KARHU <i>et al.</i> , 2011).

Fonte: Morales *et al.* (2015).

Um dos principais benefícios da transformação de resíduos orgânicos em biocarvão para as propriedades do solo podem ser: aumento do pH e da disponibilidade de nutrientes; diminuição da acidez e da toxidez por alumínio e outros metais tóxicos; redução de odores e das emissões de gases de efeito estufa; sequestro de carbono; aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), da aeração e retenção de água no solo, sendo que esses efeitos podem possibilitar um ambiente favorável para o crescimento e desenvolvimento das plantas (PNUMA, 2011).

O uso desse material em solos agrícolas tem atraído atenção da comunidade científica e de gestores públicos devido ao seu potencial agrônômico e econômico, além de benefícios ambientais (KHAN *et al.*, 2013a), o mesmo pode ser obtido a partir de uma ampla variedade de fontes, incluindo materiais lenhosos, resíduos agrícolas, esterco e outros produtos residuais (ZWIETEN *et al.*, 2010) como biofóssido.

A transformação do lodo produzido na estação de tratamento de esgoto através do processamento térmico é uma boa opção no manejo do biofóssido, para a produção de biogás, bio-óleo e biocarvão, diminuindo o potencial de contaminação ambiental por metais tóxicos quando o resíduo é transformado em biocarvão (INGUANZO *et al.*, 2002; HOSSAIN *et al.*, 2009).

Outro resíduo sugerido por Lehmann, Gaunt e Rondon (2006), como adequado para a produção rentável de biocarvão é o bagaço de cana-de-açúcar. Com uma composição química heterogênea aproximada de: 46% celulose, 25% de

hemicelulose e 20% de lignina, assim como diferentes tamanhos de partículas entre 1 e 25 mm (ICIDCA, 2000) que permitem a produção de biocarvão de boa qualidade.

Com relação aos metais tóxicos, alguns pesquisadores verificaram teores abaixo do permitido pela legislação australiana em cultivo de tomate cereja adubado com biocarvão (HOSSAIN *et al.*, 2010). Em outro estudo referente a estabilidade de metais tóxicos com aplicação de biocarvão de resíduos orgânicos, observou-se uma diminuição da concentração de Pb de 8,42 mg L⁻¹ a 5 mg L⁻¹, em lixiviados com aplicação de 10% de biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar (ABDELHAFEZ *et al.*, 2014).

3.2.1 Biocarvão de biossólido

Em relação ao uso do biossólido no solo há uma certa preocupação, pelo mesmo apresentar em sua composição metais tóxicos e microrganismos patogênicos. Caso seja usado de forma indiscriminada, pode gerar danos por causar acúmulo de metais tóxicos nos solos afetando desta forma a biota do solo, as plantas e a saúde humana. Devido a isso o uso do lodo é controlado por legislação vigente, a Resolução Federal CONAMA n° 375 de 2006, que define os critérios e procedimentos para sua utilização.

Outra forma possível para o uso/manejo do biossólido no ambiente pode ser realizado por meio do tratamento térmico – pirólise, que consiste na queima do material na ausência total ou parcial do oxigênio, ou seja, uma decomposição pelo calor ou degradação de um material por energia térmica. Esse processo promove a eliminação de patógenos e componentes orgânicos perigosos, destacando-se por possibilitar a transformação desse resíduo orgânico em biocarvão e, dessa forma permitindo a sua utilização na agricultura, reduzindo os riscos ambientais (SILVÉRIO; BARBOSA, 2008; CABALLERO *et al.*, 1997).

Existem dois tipos de pirólise: a lenta e a rápida. A primeira é uma sequência de reações com baixas taxas de aquecimento (°C/s) e longas durações, o que maximiza o rendimento do carvão, diminuindo as quantidades de bio-óleo e gás. Já a segunda é feita com elevadas taxas de aquecimento e curtas durações, produzindo principalmente vapores e aerossóis, além de carvão (LEHMANN; STEPHEN, 2009).

Ainda com referência ao processo de pirólise, Bridgwater (2012) menciona que a pirólise é uma reação endotérmica que transforma a matéria orgânica sólida em três produtos: um produto sólido (biocarvão), um produto de vapor condensável (bio-óleo) e um produto de gás não condensável.

Biocarvão vem a ser um produto sólido, rico em carbono, obtido quando a biomassa, como madeira, folhas e estrume são aquecidas em um compartimento fechado sob condições controladas de oxigenação, em temperaturas que variam de 300°C a 800°C, produzindo também um material líquido, o bio-óleo, e gases como H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄ e C₂H₆ (LEHMANN; STEPHEN, 2009; SOHI, 2012).

Alguns autores que analisaram o biossólido em diferentes temperaturas de pirólise apontam um maior rendimento em 300°C por 30 minutos, ou seja, as reações de pirólise com lodo são concluídas dentro de 30 minutos, devido a isso não há necessidade de permanência por longos períodos. Deve-se levar em conta que o biocarvão de lodo pode conter ampla variação na sua composição e caracterização, conforme a origem e o tipo de tratamento (HOSSAIN *et al.*, 2009; HOSSAIN *et al.*, 2011; AGRAFIOTI *et al.*, 2013; YUAN *et al.*, 2013; MASEK *et al.*, 2013).

Ainda em relação a temperatura, comparando o biocarvão de biossólido à 300°C ao lodo *in natura* há um aumento nos teores de nitrogênio e carbono e uma diminuição de hidrogênio. Outros estudos com biocarvão de lodo de esgoto apontam um enriquecimento nos teores de carbono, cálcio, cobre, potássio, fósforo, magnésio, ferro, zinco, capacidade de trocas catiônicas e pH, porém em relação a condutividade elétrica, nitrogênio e manganês houve uma redução nos seus valores conforme o aumento da temperatura de pirólise (BAGREEV; BANDOZ; LOCKE, 2001; COOGER; FORGE; NEILSEN, 2006; CHAN; XU, 2009; HOSSAIN *et al.*, 2010; HOSSAIN *et al.*, 2011; AGRAFIOTI *et al.*, 2013; YUAN *et al.*, 2013; MASEK *et al.*, 2013).

Sabe-se ainda que a produção do biocarvão de lodo de esgoto reduz com aumento da temperatura da pirólise, visto que Hossain *et al.* (2011) mencionam que a variação da temperatura trouxe os seguintes rendimentos: com 72,3% de rendimento a 300°C, 63,7% a 400°C, 57,9% a 500°C e 52,4% a 700°C, sendo que o maior rendimento foi observado a 300°C.

Agrafioti *et al.* (2013) também em seu estudo utilizaram temperaturas diferentes, 300°C, 400°C e 500°C; simultaneamente com três tempos de residência, 30, 60 e 90 minutos. O autor obteve os seguintes rendimentos: mínimo foi de 27,3%

a 500°C, com 90 minutos de pirólise; e o máximo aos 300 °C com rendimento de 62,5%, com 30 minutos.

Yuan *et al.* (2015) mencionam que quando o biocarvão é produzido em baixa temperatura, por ser menos recalcitrantes e capazes de serem mineralizados mais rápido pela microbiota do solo, pode ser utilizado na agricultura, pois a quantidade de compostos disponíveis que permanecem na biomassa é mais elevada. Proporcionando dessa forma benefícios ao desenvolvimento das plantas, por poder suprir parte dos nutrientes necessários a elas, sendo que esses nutrientes são disponibilizados no solo em curto prazo, logo após aplicação do biocarvão. Matheri *et al.* (2020) e Agrafioti *et al.* (2013) mencionam que o biocarvão obtido em baixas temperaturas é apropriado para aplicações agrícolas.

Biocarvões produzido em altas temperaturas, devido sua estrutura porosa, é mais adequado para remoção de poluentes. Alguns autores mencionam que o aumento da temperatura reduz a quantidade de nitrogênio, a capacidade de sorção da água e a capacidade de troca de cátions, enquanto aumenta o teor de carbono (ARSHADI; AMIRI; MOUSAVI, 2014; MATHERI *et al.*, 2020).

Ainda em relação a produção do biocarvão em temperaturas mais elevadas, por ser mais recalcitrante, outros autores mencionam que seu uso é mais adequado para o sequestro de carbono no solo e, ainda contribuem para a diminuição da biodisponibilidade de metais tóxicos e inativam microrganismos presentes no bio sólido, reduzindo os riscos de contaminação ambiental e possibilitando seu uso agrícola (AGRAFIOTI *et al.*, 2013; LIU; LIU; ZHANG, 2014; ZHANG *et al.*, 2015).

3.2.1.1 Biocarvão de bio sólido na produção agrícola e nos atributos do solo

O processo de transformação térmica faz com que o biocarvão de bio sólido apresente características adsorventes, fertilizantes e condicionadoras de solo, pois promove a melhoria dos atributos físicos, químicos ou atividade biológica podendo ainda recuperar solos degradados (SOHI *et al.*, 2014; YAVARI *et al.*, 2015; HOSSAIN *et al.*, 2009; OBIA *et al.*, 2016; SHULZ; DUNST; GLASER, 2013). O mesmo pode ser utilizado na agricultura e ser uma alternativa viável para resolver o problema gerado pelo acúmulo de lodo nas ETE's (SPOKAS *et al.*, 2012).

A adição do biocarvão ao solo traz grande potencial para aumentar a produtividade agrícola das culturas, com aproximadamente 10% de aumento médio, independente do tipo de matéria-prima e da taxa de aplicação utilizada. Isso ocorre devido ao beneficiamento dos atributos do solo com incremento do biocarvão que contribui para o aumento do pH, da capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento das culturas (MCHENRY, 2009; JEFFERY *et al.*, 2011).

Com a adição do material produzido por pirólise ao solo observa-se um aumento no número de frutos, número de grãos, número de espigas, número de perfilhos, peso seco, altura da planta e aumento de rendimento em diferentes cultivos (HOSSAIN *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2012; SCHULZ; DUNST; GLASER, 2013).

Biederman e Harpole (2013) sugerem que o biocarvão seja aplicado ao solo alguns meses antes do plantio. Eles mencionam que há uma resposta maior das culturas quando há uma aplicação conjunta do biocarvão com adubo nitrogenado.

O uso agrônômico do biocarvão de bio sólido foi avaliado por alguns autores como Khan *et al.* (2013b) que analisaram o desenvolvimento da cultura de arroz onde notou um aumento na produtividade, além da diminuição de emissões de gases de efeito estufa com o uso do biocarvão obtido com 550°C. Já Chan *et al.* (2007) trabalharam com inserção de biocarvão juntamente com fertilizante nitrogenado no cultivo de rabanete e observaram que houve um efeito positivo na cultura.

Jeffery *et al.* (2011) mencionam que, independentemente da matéria-prima que o biocarvão é produzido e das taxas de aplicação, o mesmo pode contribuir na produtividade de diversas culturas, isso ocorre devido ao aumento do pH, da capacidade de retenção de água e da disponibilidade de nutrientes. Porém têm-se obtido melhores resultados quando aplicados nas culturas de rabanete e soja, em doses de 100 mg ha⁻¹.

De acordo com Matos *et al.* (2018) a aplicação do biocarvão ao solo promove melhorias na capacidade da retenção de água e de elementos químicos provenientes de adubos orgânicos ou minerais, devido à abundância em sua estrutura de microporos. Os minerais retidos pelo biocarvão ligam-se aos grupos carboxílicos e fenólicos carregados negativamente, devido a isso diminui-se a lixiviação e melhora a eficiência da adubação, sendo assim é indicado o uso do biocarvão como condicionador do solo.

Os autores ainda mencionam que a adição deste condicionador de solo influencia diretamente no solo, não só na adição de água, como também na sua agregação, aeração, elasticidade e na capacidade de retenção de cátions. Essa aplicação pode trazer benefícios ao solo por promover melhorias na fertilidade e possibilitar um melhor desenvolvimento das culturas.

Essa inserção do biocarvão de biossólido ao solo pode trazer benefícios econômicos ao produtor, pois se ocorrer a substituição de parte dos fertilizantes minerais solúveis pelo biocarvão haverá uma diminuição dos custos de produção mantendo as altas produtividades das culturas (SCHMIDT *et al.*, 2014; PANDEY; PATEL; PATRA, 2016).

Outros autores que trabalharam com o biocarvão mostraram os benefícios de seu uso como condicionador do solo, pela capacidade de neutralizar a acidez do solo, aumentar a disponibilidade de macro e micronutrientes e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas (UZOMA *et al.*, 2012; YUAN *et al.*, 2011; SCHULZ *et al.*, 2013; DING *et al.*, 2016).

A aplicação de biocarvão é capaz de neutralizar a acidez do solo, pois exerce efeito sobre o pH do solo devido a sua alcalinidade, sendo que o poder alcalinizante pode ser explicado pela presença de grupamentos funcionais oxigenados, como $-O^-$ e $-COO^-$, com cargas negativas, na superfície do material (SIZMUR *et al.*, 2015).

Smider e Singh (2014) mencionam que a presença de carbonatos no biocarvão também pode elevar o pH do solo, uma vez que quando reagem com a água no solo, exercem efeito semelhante à calagem. Essa capacidade alcalinizante do biocarvão é essencial para o manejo de solos ácidos de regiões tropicais, o que faz com que diminua a necessidade de aplicação de calcário e, promove melhorias no solo para o desenvolvimento das culturas e incrementos de produtividade (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013).

É recomendado o uso do biocarvão com o pH elevado para solos ácidos, pois o material apresentaria uma ação neutralizante, já os biocarvões produzidos em baixas temperaturas são mais indicados para solos alcalinos, devido ao seu pH ser mais reduzido (ZHANG *et al.*, 2015).

Sabe-se ainda que a concentração de cátions como K, Na, Ca e Mg durante a pirólise, em detrimento da volatilização de outros compostos mais facilmente volatilizados, é outro fator que justifica a neutralização dos componentes da acidez do solo (YUAN *et al.*, 2011).

A aplicação de biocarvão pode interferir nos atributos químicos do solo trazendo respostas fisiológicas às plantas, isso ocorre devido o biocarvão aumentar os teores disponíveis de P, K, Ca, Mg, C e a eficiência no uso dos nutrientes. O uso do biocarvão de biossólido no solo é uma importante fonte de P para as plantas, pois a disponibilidade deste nutriente em solos altamente intemperizados e ácidos é limitada (SOUSA; FIGUEIREDO, 2015; ALVARENGA *et al.*, 2015; NOVAK *et al.*, 2009).

A adição de biocarvão de biossólido ao solo pode influenciar também na capacidade de troca catiônica (CTC), que descreve a quantidade de cátions, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , H^+ e Al^{3+} , que ficam retidos na superfície das partículas do solo, pois estudos mostram que solos que receberam a inserção de biocarvão apresentaram elevação da CTC de até 30%, comparado a solos que não receberam biocarvão (LAIRD *et al.*, 2010; RONQUIM, 2010).

Além das interferências nos atributos químicos do solo, o biocarvão apresenta influência sobre os atributos físicos, por apresentar uma constituição rica em carbono, que pode auxiliar na estruturação das partículas do solo. Podendo interferir na densidade do solo, na qual sua redução colabora para o aumento da aeração e da taxa de infiltração, tornando melhor os aspectos para um bom desenvolvimento das culturas. Sabe-se ainda que pode ocorrer interferência na resistência do solo a tração, na qual sua redução pode favorecer o crescimento radicular, propiciar maior mineralização de nutrientes, além de beneficiar a germinação de sementes (HERATH *et al.*, 2013).

O biocarvão inserido no solo pode ter potencial para modificar a biomassa microbiana, composição comunitária ou ambas. A melhoria da produtividade e qualidade do solo com aplicação de biocarvão pode estar relacionada a uma alteração na composição e abundância da comunidade microbiana (LEHMANN *et al.*, 2011; GRABER *et al.*, 2010; KOLTON *et al.*, 2011).

3.2.2 *Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar*

A cana-de-açúcar é a matéria-prima preferencial para a produção de etanol no Brasil, uma vez que esse país possui condições climáticas favoráveis ao seu plantio, com vastas áreas de terras férteis, chuvas ao longo do ano e posição

geográfica estratégica (PANDEY *et al.*, 2000; MARTINELLI; FILOSO, 2008; ELSHAHED, 2010).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro, a estimativa é de 8.605 mil hectares a área em produção (CONAB, 2020). Ainda de acordo com a CONAB (2020) a cana é cultivada majoritariamente para a produção de açúcar e biocombustível e, a sua participação na geração de resíduos agrícolas são realizadas através da geração de bagaço, torta-de-filtro e vinhaça, que podem ser empregados em diversos setores como geração de energia, alimentação animal e fertilizantes. Para a produção paulista foram destinados cerca de 4.427 mil hectares e, na Região Sudeste, como um todo, sejam dispostos 5.362,8 mil hectares.

De acordo com Keith, Singh e Singh (2011) esses resíduos agroindustriais, associados ao setor agrícola podem gerar impactos ambientais devido à alta carga orgânica, podendo ser superior a capacidade de decomposição microbiana do ambiente, o que pode gerar subprodutos cumulativos e de difícil degradação. De forma que passou-se a pensar em maneiras de reaproveitamento desses resíduos, visto que isso traria alguns benefícios como evitar o acúmulo, contribuir para o controle da poluição e viabilizar a sustentabilidade na produção agrícola.

Dentre os principais resíduos agroindustriais, destaca-se no Brasil o bagaço da cana-de-açúcar. Pois, o mesmo é um subproduto fibroso resultante da moagem da cana-de-açúcar que pode ter diversos usos, que vão desde a produção de energia através da queima até a incorporação ao solo ou como parte integrante da dieta bovina. Esse resíduo contém muita matéria orgânica, mesmo após a extração da sacarose e outros nutrientes (PANDEY *et al.*, 2000; LEHMANN; GAUNT; RONDON, 2006; MARTINELLI; FILOSO, 2008; SOARES, 2012).

Soares (2012) menciona ainda que o bagaço é uma matéria orgânica vegetal rica em polissacarídeos, celulose e hemicelulose, compostos comumente encontrados nas paredes celulares das células vegetais. A lignina também está contida nessa massa orgânica. A hemicelulose, celulose e lignina compõem mais de 75% da biomassa vegetal e conferem resistência mecânica à planta, o restante da biomassa é composta por substâncias como proteínas, óleos vegetais e minerais.

Segundo Lehmann, Gaunt e Rondon (2006), o bagaço de cana-de-açúcar é um tipo de resíduo adequado para a produção rentável de biocarvão. Com uma composição química heterogênea aproximada de: 46% celulose, 25% de

hemicelulose e 20% de lignina, assim como diferentes tamanhos de partículas entre 1 e 25 mm (ICIDCA, 2000) que permitem a produção de biocarvão de boa qualidade. Por ser um resíduo lignocelulósico, o bagaço de cana-de-açúcar, quando transformado em biocarvão possivelmente fornecera um efeito mais estrutural para o solo ajudando a aumentar a retenção de água, diminuir a densidade ou fornecer refúgio para organismos do solo (WARNOCK *et al.*, 2007; LEHMANN *et al.*, 2011).

3.3 Nitrogênio

A escassez de nitrogênio é o fator nutricional mais limitante e de ocorrência mais abrangente que afeta a produtividade dos ecossistemas terrestres. Pois o N é um elemento essencial para o crescimento das plantas, sendo que a deficiência desse nutriente pode limitar o desenvolvimento, a produtividade e a produção da biomassa na maioria das culturas (MELGAR; CAMOZZI; FIGUEROA, 1999). Esse nutriente normalmente sofre perdas por erosão, volatilização, imobilização pela biomassa microbiana e lixiviação, sendo que o último fator é mais propenso de ocorrer em solos brasileiros (BRADY; WEIL, 2013).

O N é um importante componente de todas as proteínas, incluindo as enzimas, sendo que as últimas são responsáveis por controlar praticamente todos os processos biológicos. Sendo exigido em maior quantidade pelas plantas, por constituir moléculas importantes para seu desenvolvimento como proteínas, ácidos nucleicos e clorofila (BRADY; WEIL, 2013; BISSANI *et al.*, 2008).

Sabe-se que esse elemento é disposto nos solos, em maior parte, por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Souza e Fernandes (2006) mencionam que o N também pode ser disponibilizado por meio do arraste dos óxidos de nitrogênio produzidos por descargas elétricas pela chuva e, por fim, através da adubação nitrogenada tendo a uréia como uma das principais fontes de fertilizantes minerais.

Esse elemento no solo pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica mineral (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-). Embora a fração inorgânica apresente conteúdos bem menores comparado a orgânica no solo, elas são de suma importância na nutrição das plantas (VIEIRA, 2017). A capacidade do solo em fornecer N às culturas depende da mineralização no N-orgânico para N-inorgânico, pois as plantas absorvem o

nitrogênio mineral principalmente na forma nítrica e amoniacal (N-NO_3^- e N-NH_4^+), exceto as leguminosas e as que fixam o N_2 (WILLIAMS; MILLER, 2001).

O N-orgânico, em sua maior parte, não está disponível para as plantas. O processo de retenção do N sob formas orgânicas é denominado imobilização e sua lenta liberação é chamada mineralização (BRADY, 1989). Sendo que a mineralização depende dos teores relativos de C, N, S, P, MO e atividade microbiana que estão associadas a temperatura, umidade, aeração e pH do solo (SCHLESINGER, 1997).

A maior parte do nitrogênio em sistemas terrestres é encontrada na matéria orgânica do solo, contendo normalmente cerca de 5% de N (BRADY; WEIL, 2013). Raij *et al.* (1996) mencionam que a adubação orgânica quando comparada a mineral apresenta liberação lenta de nutrientes, proporcionando disponibilidade ao longo do tempo, podendo favorecer um melhor aproveitamento, principalmente do P e do N.

Luchese, Favero e Lenzi (2002) mencionam que a relação C/N é um parâmetro importante com referência a decomposição da matéria orgânica, de forma que a decomposição da MO determina a competição pelos nutrientes essenciais (C e N) e, a atividade da biomassa microbiana do solo.

De acordo com Brady e Weil (2013) os microrganismos do solo devem incorporar em suas células cerca de oito partes de C para uma de N. Pois somente cerca de 1/3 do C metabolizado por eles são incorporados em suas células, desta forma precisam encontrar valores próximos de 1 g de nitrogênio para cada 24 g de carbono de seu alimento. Caso a relação C/N do material inserido ao solo ultrapasse 25:1, haverá uma deficiência de N para a planta.

O bio sólido pode ser considerado um adubo orgânico que contém em sua composição matéria orgânica, macro e micronutrientes que podem trazer benefícios na manutenção da fertilidade do solo, sendo que esse material possui nutrientes que podem influenciar de forma positiva no desenvolvimento e rendimento das culturas.

Esse resíduo possui cerca de 1 a 6% de N (base seca) na forma orgânica e inorgânica. Sendo que lodos digeridos anaerobicamente possuem de 30 a 60% de N amoniacal, já quanto ao lodo digerido aerobicamente este valor decresce para 5 a 20%. O N na forma orgânica tende a ser mineralizado em taxa média de 20% ao ano, sendo que desta forma o mesmo não é lixiviado (VANZO; MACEDO; TSUTIYA, 2001).

O biocarvão, produto da pirólise de matérias-primas aquecidas em temperaturas que variam de 300 a 900°C, tem-se mostrado eficiente como condicionador de solos por poder proporcionar a diminuição da lixiviação dos

nutrientes e de água no solo, atuando na estabilidade e aumento dos estoques de carbono, reduzindo os requisitos de irrigação e fertilizantes. Interações do biocarvão com microrganismos do solo podem gerar alterações das taxas de decomposição da matéria orgânica, bem como da disponibilidade de energia e NH_4 para as plantas (LEHMANN, 2007; LEHMANN; JOSEPH, 2009; DU *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2017).

3.4 *Urochloa brizantha* cv. Marandu

Estima-se que existam cerca de 200 milhões de hectares de áreas cobertas com pastagens no Brasil (COSTA; FAQUIN; OLIVEIRA, 2010). E, apenas uma pequena parte tem recebido algum tipo de fertilização, sendo que a formação dessas pastagens quase sempre é feita em solos de baixa fertilidade (MACIEL *et al.*, 2007).

O gênero *brachiaria* ocupa uma posição de destaque na pecuária brasileira (COSTA; FAQUIN; OLIVEIRA, 2010). Por possuir adaptabilidade a vários tipos de solo e resistência e, ser uma planta pouco exigente às condições edafoclimáticas, se configura como suporte alimentar essencial na criação de ruminantes tanto de corte quanto de leite (VALLE; EUCLIDES; MACEDO, 2000).

A *Urochloa brizantha* cv. Marandu é uma das gramíneas mais utilizadas ao longo do país e, a cultivar que ocupa o primeiro lugar na comercialização de sementes no Brasil sendo seus principais atributos: adaptabilidade, resistência à cigarrinha-das-pastagens, alto potencial de resposta à aplicação de fertilizantes, capacidade de cobertura do solo, capacidade de crescimento em condições de sombreamento, bom valor nutritivo e excelente produção de sementes (VALLE; EUCLIDES; MACEDO, 2000; VALLE *et al.*, 2010; JANK; VALLE; RESENDE, 2011; MOURA *et al.*, 2017).

Araújo, Gil e Tiritan (2009) mencionam que a baixa fertilidade natural dos solos, o manejo inadequado das pastagens com sobrecarga animal nos períodos secos e a não reposição dos nutrientes extraídos do sistema pelo pastejo são fatores que limitam o rendimento quantitativo e qualitativo dessas pastagens. O uso racional de compostos orgânicos no solo pode influenciar diretamente os atributos físico-químicos do solo, a nutrição e o rendimento em massa seca.

REFERÊNCIAS

ABE, F. The thermochemical study of forest biomass. **Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute**, Tsukuba City, Ibaraki, Japan, n. 352, p. 1-95, 1988.

ABDELHAFEZ, A. A.; LI, J.; ABBAS, M. H. H. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. **Chemosphere**, v.117, p. 66-71, dec/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653514007334?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

AGRAFIOTI, E. *et al.* Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.101, p.72-78, may/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237013000454>. Acesso em: 29 nov. 2021.

ALVARENGA, P. *et al.* Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. **Waste Management**, v. 40, p. 44-52, jun/2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X15000665>. Acesso em: 29 nov. 2021

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo de esgoto no solo. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (coords). **Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, SANEPAR, 2001.

ARAUJO, F. F.; GIL, F. C.; TIRITAN, C. S. Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 1-6, jan./mar 2009. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/3319>. Acesso em: 29 nov. 2021

ARSHADI, M.; AMIRI, M. J.; MOUSAVI, S. Kinetic, equilibrium and thermodynamic investigations of Ni(II), Cd (II), Cu (II) and Co (II) adsorption on barley straw ash. **Water Resour. Indus.**, v.6, p. 1-17, aug/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371714000158?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021

BAGREEV, A.; BANDOZ, T. J.; LOCKE, D. C. Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage derived fertilizer. **Carbon**, v. 39, p.1971-1979, nov/2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622301000264>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BARBOSA, G. M. C.; FILHO, J. T. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, n. 4, p. 565-580, out./dez 2006.

BARROS, I. T., COSTA, A. C. S. da; ANDREOLI, C. V. Avaliação da higienização de lodo de esgoto anaeróbio através do tratamento ácido e alcalino. **Sanare: Revista Técnica da Sanepar**. Curitiba, v. 24, n. 24, p. 61-69, jan./jun 2006.

BARROS, C. C.; LEAL, A. C.; PINTO, J. Coleta e tratamento de esgoto no município de Presidente Prudente – São Paulo – Brasil. *In: ÁGUAS URBANAS II - SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REGENERAÇÃO AMBIENTAL DE CIDADES*, 2., 2007. **Anais...** Londrina: UEL, 2007. p. 1-271.

BEESELEY, L. *et al.* A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. **Environmental Pollution**, v.159, p 3269-3282, dec/2011. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749111003939?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021

BEGA, J. M. M. *et al.* Uma visão sobre o funcionamento de estações de tratamento de esgoto: estudo de caso. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 15, n. 04, p.1-17, dez/2019. Disponível em:
https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/2206/2048. Acesso em: 29 nov. 2021.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. A disposição do lodo de esgoto em solo agrícola. *In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. (Ed.). Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p.25-36.

BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **Global Change Biology Bioenergy**, v.5, p.202-214, dec/2013. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12037>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BISSANI, C. *et al.* **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2008.

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de bio sólido. II – disponibilidade. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 28, p.557-568., jun/2004. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/CmC7VsqMvwGnXWzQs3G3QLR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio Janeiro, Freitas Bastos, 1989.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 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 União**, Brasília, Distrito Federal, ago/2006. Disponível em:
<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretária de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa nº35, de 04 de Julho de 2006**. Brasília, 2006.

BRASIL. **Lei N° 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 29 nov. 2021.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass Bioenergy**, v.38, p. 68-94, mar/2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411000638>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CABALLERO, J. A.; FRONT, R.; CONESA, J. A. Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Cidade, v. 40-41, p. 433–450, may/1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237097000454>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso do lodo de esgoto na reestruturação do solo degradado. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p.1389-1397, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/hYRf5yBpRX4qkCYZBLwH4dg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CAO, X. *et al.* Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar. **Environ. Sci. Technol.**, v.45, p. 4884-4889, may/2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es103752u>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CARVALHO, A. G. *et al.* Efeito da adição de resíduos de poda da erva-mate em painéis aglomerados. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 39, n. 1, p. 209-214, 2015. Disponível em: http://bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/14301/Revista_%c3%81rvore_v39_n1_p209-214_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 29 nov. 2021.

CHAN, K. Y. *et al.* Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, v.45, n.8, p. 629-634, dec/2007. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR07109>. Acesso em: 29 nov. 2021

CHAN, K. Y. *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments. **Australian Journal of Soil Research**, v.46, n.5, p. 437-444, aug/2008. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR08036>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CHAN, K. L.; XU, Z. Biochar: nutriente properties and their enhancement. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S., **Biochar for environmental mangement**: Science and Technology. London: Earthscan Publishing, 2009, p. 67-84.

CHAPMAN, H. Cation-exchange capacity. *In*: NORMAN, A. (Ed.), **Methods of Soil Analysis**. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy monograph. Riverside, California: University of California, 1965. p. 891–901.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-açúcar: Monitoramento Agrícola. **Safra 2020/21**, Brasília, v.7, n.2, p.1-64, 2020.

COOGER, S. G.; FORGE, T. A.; NEILSEN, G. H. Biosolid recycling: nitrogen management and soil ecology. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 86, n.4, p.613-620, aug/2006. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/S05-117>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CORDEIRO, L. A. M. *et al.* **Integração lavoura-pecuária em solos arenosos: estudo de caso da fazenda Campina no Oeste Paulista**. Planaltina:Embrapa Cerrados, 2020.

CORNELISSEN, G. *et al.* Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation. **Environ. Sci. Technol.**, v.39, n.18, p. 6881-6895, aug/2005. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es050191b>. Acesso em: 29 nov. 2021.

COSTA, K. A. P.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I. P. Doses e fontes de nitrogênio na recuperação de pastagens do capim-marandu. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec**, v. 62, n.1, p.192-199, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/C9GcNBCyJsGVMPRPJjCWKSS/?format=pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CUBA, R. M. F.; GUIMARÃES, M. S.; TERÁN, F. J. C. Produção de biocarvão a partir de bagaço de cana-de-açúcar para remoção de glifosato (formulação comercial) em meio aquoso. *In*: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 1., 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, jun/2018. p.1-7.

CUNHA, T. J. F. *et al.* Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 85-93, fev/2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/FG37rnQfkHmwncgF7QFmYPb/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

DING, Y. *et al.* Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 36, p. 1-18, may/2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-016-0372-z#citeas>. Acesso em: 29 nov. 2021.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *In*: DORAN, J. W. *et al.* (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. v. 1, cap. 1, p. 3-21.

DU, Z. *et al.* Consecutive biochar application alters soil enzyme activities in the winter wheat–growing season. **Soil. Sci**, v. 179, n.2, p. 75-83, feb/2014. Disponível em: [https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2014/02000/Consecutive Biochar Application Alters Soil Enzyme.3.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2014/02000/Consecutive_Biochar_Application_Alters_Soil_Enzyme.3.aspx). Acesso em: 29 nov. 2021.

ELSHAHED, M. S. Microbiological aspects of biofuel production: Current status and future directions. **Journal of Advanced Research**, v. 1, n.2, p. 103-111, Apr/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123210000329>. Acesso em: 29 nov. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *In: O USO DO LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA: PRECAUÇÕES COM OS CONTAMINANTES ORGÂNICOS*. Jaguariúna, 2007.

ENDERS, A. *et al.* Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresour. Technol.**, v.114, p. 644-653, jun/2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852412004403?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FARIA, P. H. S.; SANTOS, H. I. S. **Uso do lodo primário de esgoto urbano de ETE's na recuperação de áreas degradadas**. Goiânia: Editora, 2007.

FARIAS, W.M. *et al.* Propriedades físicas e químicas de substratos produzidos utilizando macrófitas aquáticas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 3257-3270, mar/2013. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/12117/13622>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de bio sólidos**: PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

FOX, T. A.; CHAPMAN, L. Engineering geo-engineering. **Meteorological Applications**, v. 18, n.1, p. 1-8, feb/2011. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.245>. Acesso em: 29 nov. 2021.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biol Fertil Soils**, 35 (4), p. 219-230, jun/2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-002-0466-4>. Acesso em: 29 nov. 2021.

GRABER, E.R. *et al.* Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. **Plant & Soil**, v. 337, p. 481-496, sep/2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-010-0544-6>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HERATH, H. M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: ver Alfisol and ver Andisol. **Geoderma**, v. 209-210, p. 188-197, nov/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706113002164?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HOSSAIN, M.K. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, 92, n.1, p. 223-228, jan/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710002938>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HOSSAIN, M. K. *et al.* Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomate (*Lycopersicum esculentum*). **Chemosphere**, v, 78, n.9, p. 1167-1171, fev/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653510000275>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.85, n. 1-2, p. 442-446, may/2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237008001228>. Acesso em: 29 nov. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Area territorial e população estimada**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/presidente-prudente.html>. Acesso em: 15 maio 2020.

ICIDCA. **Manual de los derivados de la caña de azúcar**. 3. ed. Ciudad Habana: ICIDCA, 2000. 485p.

INGUANZO, M. *et al.* On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 63, n.1, p. 209-222, mar/2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237001001553?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

JANK, L.; VALLE, C. B.; RESENDE, R. M.S. Breeding tropical forages. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.11, 27-34, jun/2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cbab/a/gjcszqsQ7KZTDZqPRcGVmYL/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

JEFFERY, L. S. *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.144, n. 1, p. 175-187, nov/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880911003197>. Acesso em: 29 nov. 2021.

JEFFERY, S. *et al.* Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. **Environmental Research Letters**, v.12, n.5, Apr/2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa67bd>. Acesso em: 29 nov. 2021.

JOSEPH, S. D. *et al.* Biochar for carbono sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility; A review of the materials science. *In: PROCEEDINGS OF THE AUSTRALIAN COMBUSTION SYMPOSIUM*, dec/2007, Sydney. **Proceedings...** Sydney: University of Sydney, 2007. p. 9-11.

JOSEPH, S. *et al.* Developing a biochar classification and test methods. *In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. London: Earthscan, 2009. p. 107-126.

KARHU, K. *et al.* Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – results from a short-term pilot field study. **Agric. Ecosys. Environ.**, v.140, n.1-2, p. 309-313, jan/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880910003208>. Acesso em: 29 nov. 2021.

KEILUWEIT, M. *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environ. Sci. Technol.**, v. 44, n.4, p. 1247-1253, feb/2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20099810/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

KEITH, A.; SINGH, B.; SINGH, B. P. Interactive priming of biochar and labille organic matter mineralization is a smectite-rich soil. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 22, p. 9611-9618, sep/2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es202186j>. Acesso em: 29 nov. 2021.

KHAN, S. *et al.* Reduced bioaccumulation of PAHs by *Lactuca sativa* L. grown in contaminated soil amended with sewage sludge and sewage sludge derived biochar. **Environmental Pollution**, v. 175, p. 64-68, apr/2013a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749112005398?via%3DiHub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

KHAN, S. *et al.* Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil. **Environmental Science & Technology**, v.47, n.15, p. 8624-8632, jun/2013b. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es400554x>. Acesso em: 29 nov. 2021.

KOCSSIS, M. A.; MARIA, I. C. D. O efeito do lodo de esgoto na recuperação da estrutura física de solos degradados. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS*, 6., 2004, Goiânia. **Caderno de resumos...** Goiânia: ABG, 2004.

KOLTON, M. *et al.* Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial structure of fully developed greenhouse pepper plants. **Applied Environmental Microbiology**. V.77, n.14, p. 4924–4930, jul/2011. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/AEM.00148-11>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LAIRD, D. A. *et al.* Biochar impacy on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v.158, n. 3-4, p. 436-442, sep/2010a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706110001758>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LAIRD, D. A. *et al*; FLEMING, P.; DAVIS, D.D.; HORTON, R.; WANG, B.; KARLEN, D.L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n.3-4, p. 443-449, sep/2010b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001670611000176X?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Washington, v. 5, n. 7, p. 381- 387, sep/2007. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/1540-9295%282007%295%5B381%3ABITB%5D2.0.CO%3B2>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota – a review. **Soil Biol. Biochem**, v. 43, n.9, p. 1812-1836, sep/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071711001805>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Biochar sequestration in terrestrial Ecosystems: a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Springer**, n. 11, p. 403-427, may/2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-005-9006-5>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: Introduction. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. London Earthscan, 2009. p. 1-12.

LEHMANN, J.; STEPHEN, J. M. (Eds.). *Biochar for environmental management: Science and Technology*. London:Earthscan, 2009. p. 1-448.

LI, H. *et al.* Mechanisms of metal sorption by biochar: Biochar characteristics and modifications. **Chemosphere**, v. 178, p. 466-478, jul/2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517304356>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LIU, T.; LIU, B.; ZHANG, W. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.23, n. 1, p. 271-275, 2014. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Nutrients-and-Heavy-Metals-in-Biochar-Produced-by-Liu-Liu/6552358934b6cbcc5500b7c658b9ae61dfbe3ebe>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LOPES, J. A. V.; QUEIROZ, S. M. P. Rodovias e meio ambiente no Brasil: Uma resenha crítica. *In*: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, SIMPÓSIO SUL AMERICANO, 1; SIMPÓSIO NACIONAL, 2, Curitiba, 1994. **Anais...** Curitiba, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1994. p.75-90.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo: teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2002.

MACIEL, G. A. *et al.* Efeito de diferentes fontes de fósforo na *Brachiaria brizantha* cv. Capim – marandu cultivada em dois tipos de solos. **Ciência Animal Brasileira**, v.8, n. 2, p. 227-233, abr./jun 2007. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/index.php/vet/article/view/1345>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MADARI, B. E.; MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Context and importance of biochar research. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n.5, p. i-ii, may/2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/xF9q4H9NfvbtZr5cMFfVGYv/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MAIO, M. M. *et al.* Atributos físicos do solo, adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Ceres**, v. 58, n.6, p.823-830, nov./dez 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/w6Jrf33SpPnGtjC5z3frYpK/?format=pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MANGRICH, A. S. *et al.* Biocarvão – As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, v.47, p.48-52, mai/2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/42153/1/biocarvao281.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MALAVOLTA, E.; GOMES, F.P.; ALCARDE, J.C. Adubos e adubações. *In*: MALAVOLTA, E. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2000. 200 p.

MARQUES, M. O. **Efeitos da aplicação do lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. 1990. 164 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

MARQUES, M. O *et al.* Sugarcane parameters in biosolid and vinasse added soil. *In*: FAZ CANO, A.; ORTIZ SILLA, R.; MERMUT, A. R. Sustainable use and management of soils in and semiarid regions. Catagena: **Quaderna Editorial**, v.2, 2002, p.549-50.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of surcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, v. 18, n.4, p.885-898, jun/2008. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/07-1813.1>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MASEK, O. *et al.* Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. **Fuel**, v.103, p. 151-155, jan/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236111005187>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MATHERI, A. N. et al. Influence of pyrolyzed sludge use as ver adsorbent in removal of selected trace metals from wastewater treatment. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v.2, sep/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016420300165>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MATOS, E. C. T de. et al. Espectroscopia fotoacústica para analisar a fertilidade de solos tratados com biochar e micorriza. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 41, n. 9, p. 989-998, ago/2018. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/v41n9a05.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MCHENRY, M. P. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbono sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.129, n.1-3, p.1-7, jan/2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880908002375>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MELO, W. J. et al. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.18, p.449-455, 1994. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Efeito-de-doses-crescentes-de-lodo-de-esgoto-sobre-Melo-Marques/3d06a1ea0349a22975df8b7e193de173fe6e1299#related-papers>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MELGAR, R.; CAMOZZI, M. E.; FIGUEROA, M.M. **Guia de fertilizantes em miendas y productos nutricionales**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária, 1999. cap. 1, p. 13-25.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.109-141.

METCALF; EDDY, Inc. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse**. 3rd Ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.

MORALES, V. L. et al. Reverse engineering o biochar. **Bioresource Technology**, vol.183, p.163-174, may/2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852415002138>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. 626 p.

MOURA, A. M. et al. Pasture productivity and quality of *Urochloa brizantha* cultivar Marandu evaluated at two grazing intervals and their impact on milk production. **Animal Production Science**, v.57, n.7, p.1384-1391, marc/2017. Disponível em:

<https://www.publish.csiro.au/an/AN16715>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. **Geoderma**, v.163, n.3-4, p. 247-255, jul/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706111001091?via%3DiHub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MULLEN, C. A. *et al.* Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. **Biomass Bioenergy**, v.34, n.1, p. 67-74, jan/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953409002037>. Acesso em: 29 nov. 2021.

NASCIMENTO, A. L. *et al.* Crescimento e produtividade de semente de mamona tratada com lodo de esgoto. **Revista Caatinga**, v.24, n.4, p. 45-151, out./dez 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277158378_CRESCIMENTO_E_PRODUTIVIDADE_DE_SEMENTE_DE_MAMONA_TRATADA_COM_LODO_DE_ESGOTO. Acesso em: 29 nov. 2021.

NOVOTNY, E. H. *et al.* Biochar: pyrogenic biochar for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, mar./apr 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/48TVdxcrPntYWZhXyPt9MKS/?lang=en>. Acesso em: 29 nov. 2021.

NOVAK, J. N. *et al.* Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105-112, feb/2009. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60820000/Manuscripts/2009/Man809.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

NOVAK, J.; BUSSCHER, W. Selection and use of designer biochar to improve characteristics of Southeastern USA coastal plain degraded soil. J.W. Lee (Ed.), **Advanced Biofuels and Bioproducts**, Springer, New York, p. 69-96, jun/2013. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-3348-4_7. Acesso em: 29 nov. 2021.

NUVOLARI, A. *et al.* **Esgoto Sanitário**: Coleta transporte tratamento e resíduo agrícola. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2003. 520 p.

OBIA, A. *et al.* In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 33-44, jan/2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715001798>. Acesso em: 29 nov. 2021.

OLIVEIRA, F.C. *et al.* Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Rev. Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p. 505-519, out/2002. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/qyTfcbGT9sHsJP774gLgN7P/?format=pdf>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

OLIVEIRA, J. B. *et al.* **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: IAC/Embrapa Solos, 1999.

PAGLIAI, M. *et al.* Tillage biochar and soil quality. 1: soil porosity and related physical properties. **Italian Journal of Agronomy**, v. 2, n.1, p. 11-20, 1998.

Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IT1999060653>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

PANDEY, A. *et al.* Biotechnological potential o agro-industrial residues. I: surcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, n.1, p.69-80, aug/2000. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085249900142X>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

PANDEY, V; PATEL, A; PATRA, D. D. Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.).

Ecological Engineering, v. 90, p. 361-366, may/2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857416300209>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

PEDROSA, M. V. B. *et al.* Biossólido de lodo de esgoto na agricultura: desafios e perspectivas. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 9, n. 4, 2017.

PHILIPPI JR, A; MALHEIROS, T. F. Saneamento e Saúde Pública: integrando Homem e Ambiente. *In*: PHILIPPI JR, A. (Org). **Saneamento, Saúde e Ambiente**: fundamento para um desenvolvimento sustentável. Bauerí, SP: Manole, 2005. v.2, p. 3-31.

PNUMA. El suelo ver elemento olvidado. **TUNZA: Revista para jóvenes**, Guadalajara, p. 1-24, 2011

RAIJ, B van *et al.* (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. (Boletim Técnico, v.100).

RAJKOVICH, S. *et al.* Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochar with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, p. 271-284, 2012. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-011-0624-7>. Acesso em: 29 nov. 2021.

REZENDE, E. I. P. *et al.* Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, p. 426-433, nov/2011. Disponível em:

<http://static.sites.sbgq.org.br/rvq.sbgq.org.br/pdf/v3n5a07.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

RONQUIM, C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: **Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 8**, 1 ed, nov/2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/882598/1/BPD8.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RUIVO, M. de L. P.; BARROS, N. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Relações da biomassa microbiana do solo com características químicas de frações orgânicas e minerais do solo após exploração mineral na Amazônia Oriental. **Ciências Naturais**, Belém, v. 1, p. 121-131, mai/ago 2006. Disponível em: <https://repositorio.museu-goeldi.br/bitstream/mgoeldi/127/1/B%20MPEG%20C%20Nat%201%282%29%202006%20ruivo.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SANDER, M.; PIGNATELLO, J. J. Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments. **Environ. Sci. Technol.**, v.39, n.6, p. 1606-1615, mar/2005. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15819216/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. CETESB. **Norma P.4.230: Manual Técnico, Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação**. São Paulo:CETESB, 1999.

SANTOS, C. H. *et al.* Fertilidade do solo e nutrição de tangerineiras 'Ponkan' manejados com resíduos sólidos e adubação química. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.1, p.75-83, out/2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/HdNHZQB56jwMD3DPrVVS7d/?format=pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SCHLESINGER, W. H. **Biogeochemistry**: na analysis of global change. California: Academic Press, 1997.

SCHMIDT, H. *et al.* Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.191, p.117-123, jun/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880914001984>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SCHULZ, H.; DUNST, G.; GLASER, B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, v.33, p. 817-827, may/2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-013-0150-0>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SHUMAN, L.M. Effect of organic waste amendments on cádmium and lead in soil fractions of two soils. **Comm. Soil Science and Plant Analysis**, v.29, n. 19-20, p. 2939-2952, 1998. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103629809370167>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SILVA, A. G. da *et al.* Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais. **Engenharia Sanitária Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES. 2008, v. 13, n. 4, p. 371-379, out/dez 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/n4w4Mbs56CT49GVhyJCscPK/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SILVERIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A. A pirólise como técnica analítica. **Química Nova**, v.31, n.6, p. 1543-1552, ago/2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/nQNVHt9YST7ksw7YMzrbkVp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SIZMUR, T. *et al.* Application of biochar for soil remediation. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, v.63, p. 295-324, oct/2015. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaspecpub63.2014.0046.5>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SKORUPA, L. A. *et al.* Uso de lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas. *In*: ANDREOLI, C. V. (Coord.) Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: **ABES**, 2006, p.189-234. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1025104?mode=full>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SMIDER, B.; SINGH, B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 191, p. 99-107, jun/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880914000462>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SOARES FILHO, C. V. Recomendação de espécies e variedades de *Brachiaria* para diferentes condições. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 1994, Piracicaba. **Anais...**Piracicaba:USP, 1994.

SOARES, L. C. S. R. **Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

SOARES, S. *et al.* Mineralização da torta de mamona, esterco bovino e bagaço de cana estimada pela respiração microbiana. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5, n. 1, 2004. Disponível em: <http://joaootavio.com.br/bioterra/workspace/uploads/artigos/esterco-5181dc586d909.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SOHI, S. *et al.* Long-term balance in heavy metal adsorption and release in biochar derived from sewage sludge. **Geophysical Research Abstracts**, v. 16, apri/may 2014. Disponível em:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014EGUGA..1615624S/abstract>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SOHI, S. P. Carbon storage with benefits. **Science**, v. 338, n. 6110, p. 1034-1035, nov/2012. Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23180849/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SONG, X. D. *et al.* Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. **Chemosphere**, v. 109, p. 213-220, aug/2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653514001611>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 32, n. 2, p. 127-138, marc/2015. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01448765.2015.1093545>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SOUZA, E. D. *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.1, p. 78-88, fev/2010. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/srPtcWvTfNh7N6gCfLc86XB/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SOUZA, E. D. *et al.* Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 323-329, mar/2006. Disponível em:

<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/940>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M.S. Nitrogênio. *In*: FERNANDES, M.S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, 2006, p. 214-252.

SPOKAS, K. A. *et al.* Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. Special Section: Environmental Benefit of Biochar. **Journal of Environmental Quality**, v.41, n.4, p. 973-989, jul/2012. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2011.0069>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

SPOKAS, K. A.; NOVAK, J.M.; VENTEREA, R.T. Biochar's role as ver alternative n-fertilizer: ammonia capture. **Plant Soil**, v.350, p. 35-42, jan/2012. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-0930-8>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biochar gerados em estações de tratamento de esgotos. *In*: BETTIOL, W., CAMARGO, OA. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA, 2000.

UZOMA, K. C. *et al.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 2, p. 205-212, apr/2012.

Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

VALLE, C. B.; EUCLIDES, V. P. B.; MACEDO, M. C. M. Características das plantas forrageiras do gênero *Brachiaria*. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 17., 2000, Piracicaba: **Anais...** Piracicaba:USP, 2000. p. 65-108.

VALLE, C. B. *et al.* Gênero *brachiaria*. *In*: FONSECA, D.M.; MATUSCELLO, J. A. (Eds.). **Plantas forrageiras**. Viçosa: Editora UFV, 2010. p. 30–77.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande:Epgraf, 1994.

VANYSACKER, L. *et al.* Biofouling ecology as a means to better understand membrane biofouling. **Applied Microbiology Biotechnology**, v.98, p. 8047-8072, aug/2014. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00253-014-5921-2>. Acesso em: 29 nov. 2021.

VANZO, J. E.; MACEDO, L. S.; TSUTIYA, M. T. Registros da produção de lodo de esgoto. O caso da ETE de Franca. *In*: TSUTIYA, M. T. *et al.* (ed.) **Biossólidos na agricultura**. São Paulo:SABESP, 2001.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília: Embrapa, 2017.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodos Ativados**. Belo Horizonte:Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997. v.4. 415 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. v.1.

YAVARI, S.; MALAKHAMAD, A.; SAPARI, N. B. Biochar efficiency in pesticides sorption as a function of production variables - a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 13824-13841, aug/2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-015-5114-2>. Acesso em: 29 nov. 2021.

YUAN, J. *et al.* Amendment of acid soils with crop residues and biochars.

Pedosphere, v. 21, n. 3, p. 302-308, jun/2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016011601306>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

YUAN, H. *et al.* Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge pyrolysis. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v.15, p. 357-361, apr/2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-013-0126-9>. Acesso em: 29 nov. 2021.

YUAN, H. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 284-289, apr/2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237015000224>. Acesso em: 29 nov. 2021.

WARNOCK, D. D. *et al.* Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. **Plant Soil**, v. 300, p. 9-20, sep/2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-007-9391-5>. Acesso em: 29 nov. 2021.

WILLIAMS, L.E.; MILLER, A. J. Transporters responsible for the uptake and partitioning of nitrogenous solutes. **Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v. 52, p.659-688, jan/2001. Disponível em: <https://eprints.soton.ac.uk/56083/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

WOODS, W. I.; GLASER, B. **Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time**. Hardcover:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. v.14, 216p.

ZELAYA, K. P. S. *et al.* In sugar beet production and nutrition. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 5, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/Vt65bdkP8yyJNfqfMfzHYmh/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 29 nov. 2021.

ZIELIŃSKA, A. *et al.* Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 201-213, 2015.

ZHANG, J. *et al.* Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. **Scientific Reports**, v. 5, p. 9406, 2015.

ZHANG, A. *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, 127: 153-160, 2012.

ZHAO, M. Y.; ENDERS, A.; LEHMANN, J. Short-and long-term flammability of biochar. **Biomass and Bioenergy**, vol. 69, p.183-191, 2014.

ZHU, D.; KWON, S.; PIGNATELLO, J. J. Adsorption of single-ring organic compounds to wood charcoals prepared under biochar thermochemical conditions. **Environ. Sci. Technol.**, 39, p. 3990-3998, 2005.

ZWIETEN, V. L. *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, p. 235-246, 2010.

ARTIGO I:

RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCÁRVÕES PARA FINS DE CONDICIONANTE DE SOLOS

I. RESÍDUOS ORGÂNICOS E BIOCARVÕES PARA FINS DE CONDICIONANTE DO SOLOS

RESUMO

A caracterização adequada de resíduos é importante, pois possibilita estimar a variabilidade de sua composição, auxiliando na definição do seu uso no solo. O objetivo do presente estudo foi caracterizar matérias-primas e biocarvões produzidos em condições de laboratório, além de fornecer informações referentes a viabilidade de uso do biocarvão no solo. Assim, numa primeira etapa os biocarvões foram produzidos a partir da amostra seca de biossólido e, de uma amostra seca de bagaço de cana-de-açúcar, separadamente, por meio da pirólise lenta a temperatura de 350°C. Numa segunda etapa foi realizado a caracterização das matérias-primas e seus respectivos biocarvões. Foi utilizado delineamento com cinco repetições, onde os tratamentos foram constituídos por: biossólido puro (BP); bagaço de cana-de-açúcar puro (BCP); biocarvão de biossólido (BB); biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar (BBC). A avaliação dos resíduos orgânicos e biocarvões foi por meio das análises de: rendimento de massas, imediatas, potencial hidrogeniônico, capacidade de troca catiônica, teor de nutrientes, espectrometria de fluorescência de raio x, bromatológica, densidade de partículas e tamanho de partículas. Os dados obtidos na caracterização dos materiais foram submetidos à análise de variância pelo programa SISVAR. Para comparação de médias, foi utilizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Já a correlação de Pearson foi feita pelo software R e utilizado o teste t a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). O BP e o BB obtiveram pH mais alcalino, maior teor de nutrientes e capacidade de troca catiônica. Enquanto o BCP e BBC apresentaram maior valor para a matéria orgânica, carbono orgânico e potássio. As matérias-primas e seus respectivos biocarvões apresentaram características propícias para o uso agrícola, principalmente o BP e o BB, sendo que o BP e o BB podem ser utilizados como corretivo de solos, por apresentarem pH alcalino de 12,02 e 9,64.

Palavras-chave: Biossólido. Bagaço de Cana-de-Açúcar. Pirólise. Atributos do Solo.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se o esgotamento dos recursos naturais que tem sido motivo de preocupação, pois são necessários para a sobrevivência humana. Entre esses recursos tem-se o solo, que é de suma importância, uma vez que através dele são realizadas diversas atividades, que vão desde a construção de obras de engenharia até a produção de alimentos para abastecimento da população mundial.

Preservar e aumentar a qualidade desse recurso é fundamental, pois em várias partes do planeta a capacidade dos solos de produzirem alimentos vem diminuindo (BRADY; WEIL, 2013). Dessa forma torna-se necessário o uso de práticas de manejo e conservação do solo por meio de novos conhecimentos e tecnologias, de modo a proteger o ambiente e garantir a produção para suprir a demanda populacional.

É nesse contexto que introduz-se o estudo da aplicação de resíduos orgânicos ao solo como condicionadores, tais como o biossólido, resíduo este gerado do tratamento final das águas residuárias nas ETE's. A utilização desse resíduo orgânico no solo seria uma forma de reciclagem agrícola, visto que o mesmo é produzido em grandes quantidades e não tem uma utilização viável, pois na maioria das vezes é acondicionado em bag's ou em aterros sanitários dentro da própria estação de tratamento, inviabilizando grandes áreas.

O biossólido pode desempenhar um papel importante na produção agrícola e na manutenção do solo, por possuir em sua composição matéria orgânica, alguns nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, sendo em maior quantidade o N e P (ALAMINO *et al.*, 2007).

Outro resíduo que pode ser estudado para possível inserção ao solo é o bagaço de cana-de-açúcar (BCP), resíduo lignocelulósico agroindustrial. A produção anual de cana-de-açúcar em todo o mundo foi estimada em aproximadamente 1,6 bilhão de toneladas, considerando que para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida, são geradas 0,28 toneladas de bagaço, 448 milhões de toneladas de bagaço são geradas anualmente em todo o mundo (SCHMITT *et al.*, 2020). Ainda segundo esses autores, no Brasil são produzidos aproximadamente 178 milhões de toneladas de bagaço.

Segundo a Conab (2021) a região Centro-Sul representa o maior eixo produtivo do país, com estimativa de colheita de 574.800,5 mil toneladas de cana-de-açúcar, sendo que os principais estados produtores são: São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. De acordo com Alokika *et al.* (2021) após o processamento industrial da cana-de-açúcar, o bagaço é gerado em grande quantidade. Santos *et al.* (2011) mencionam que por mais que seja utilizado como combustível dentro das próprias destilarias, o excedente desse resíduo é significativo.

A utilização de resíduos, urbanos e agroindustriais, seria uma forma de tentar aumentar ao máximo a reciclagem dando um destino sustentável a ambos. Pedroza

et al. (2005) mencionam que a reciclagem agrícola tem se constituído em uma das formas mais utilizadas em diversos países desenvolvidos como: Bélgica, 29%; Dinamarca, 54%; França, 58%; Alemanha, 27%; Itália, 33%; Espanha, 50%; Reino Unido, 44% como condicionador e fertilizante do solo.

Os resíduos podem ainda ser transformados em biocarvão por meio da pirólise, técnica onde a matéria-prima passa por um processo de degradação térmica (AMONETTE; JOSEPH, 2009). A pirólise permite a eliminação de patógenos no caso do biossólido, evitando possíveis riscos de contaminação. O biocarvão vem a ser o resultado da pirólise, produzido em temperatura relativamente baixa, menor que 700°C (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Ele é um material constituído por elevado teor de carbono e, quando utilizado no solo pode trazer melhorias relacionada aos atributos químicos, físicos e biológicos (CONZ *et al.*, 2017).

A caracterização adequada de resíduos é importante, pois possibilita estimar a variabilidade de sua composição, auxiliando na definição do seu uso no solo. Sabe-se que uma caracterização química permite razoável aproximação dos efeitos que a aplicação de resíduos pode causar ao solo (NOBILE, 2009). Dessa forma, o presente estudo objetivou caracterizar matérias-primas e biocarvões, além de fornecer informações referentes a viabilidade de uso do biocarvão no solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

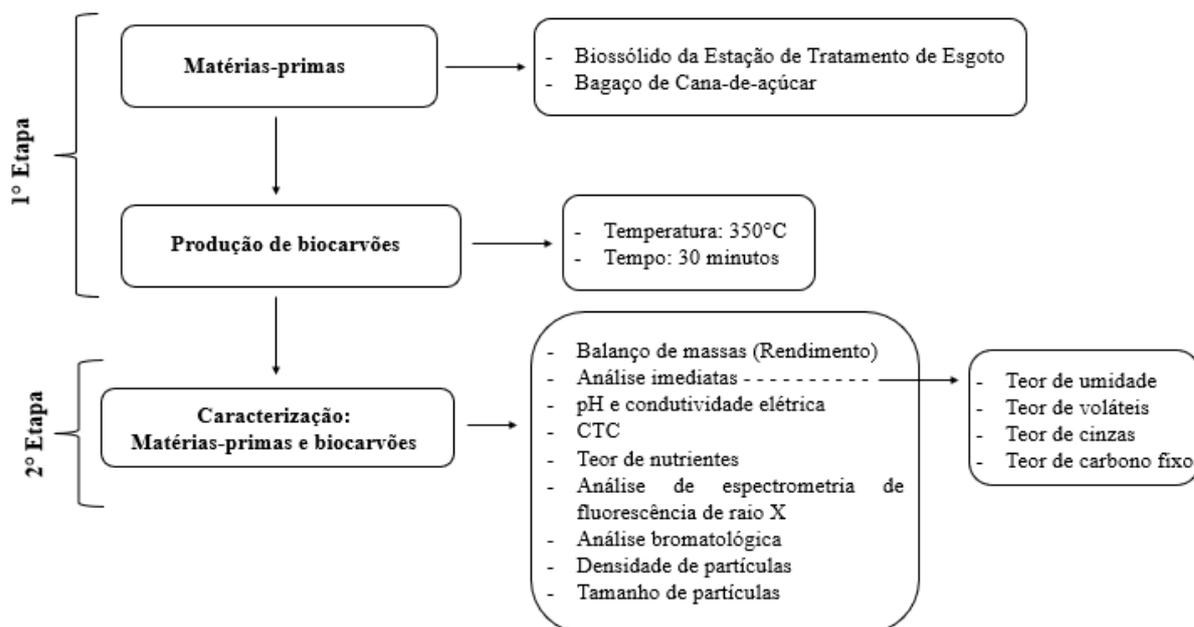
2.1 Local de desenvolvimento do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Química no Campus II da Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, situado no município de Presidente Prudente, estado de São Paulo.

2.2 Etapas de desenvolvimento do projeto

O presente capítulo foi dividido em duas etapas de trabalho: produção e caracterização dos materiais. Para melhor entendimento, a Figura 1 apresenta a cronologia das etapas realizadas neste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma concernente as etapas de produção e caracterização



Fonte: A autora.

2.1.1. Etapa 1 – Produção

2.1.1.1 Matérias-primas

Para a seleção das matérias-primas levou-se em consideração a quantidade produzida de resíduos provenientes no setor de saneamento básico e no setor agroindustrial. Com intuito de buscar um destino sustentável para o biossólido e uma nova forma de reaproveitamento para o bagaço de cana-de-açúcar, ambos foram incluídos como matérias-primas no presente estudo.

O biossólido foi proveniente da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, unidade de Presidente Prudente - SP. E, o bagaço de cana-de-açúcar foi fornecido por uma usina instalada no Pontal do Paranapanema.

O biossólido foi proveniente da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, unidade de Presidente Prudente - SP. E, o bagaço de cana-de-açúcar foi fornecido por uma usina instalada no Pontal do Paranapanema.

Inicialmente o biossólido foi seco ao ar livre em local coberto (Figura 2). Posteriormente deu-se início ao processo de destorroamento do material, foi necessário utilizar equipamentos como: almofariz de porcelana, mão de gral e peneira (Figura 3).

Figura 2 – Processo de secagem do biossólido



Fonte: A autora.

Figura 3 – Processo de destorroamento do biossólido



Fonte: A autora.

O bagaço de cana-de-açúcar veio acondicionado em sacos plásticos (Figura 4a). E, devido ao material se encontrar um pouco úmido foi necessário separá-los em saquinhos de papel (Figura 4b) para serem enviados a estufa de circulação forçada a 65°C, onde permaneceram por 72h. Após a secagem do material, foi realizado a moagem (Figura 4c) para posteriormente iniciar o processo de pirólise no Laboratório de Química da UNOESTE.

Figura 4 – Acondicionamento de bagaço de cana-de-açúcar em sacos e moagem



Fonte: A autora.

Legenda: (a) Bagaço de cana-de-açúcar em saco plástico; (b) Bagaço de cana-de-açúcar acondicionados em sacos de papel; (c) Bagaço de cana-de-açúcar moído.

2.1.1.2 Produção de biocarvões

Os biocarvões foram produzidos a partir de uma amostra seca de biossólido e, de uma amostra seca de bagaço de cana-de-açúcar, por meio da pirólise lenta em reator de laboratório do tipo leito fixo. O reator de formato cilíndrico (Figura 5a), fabricado com aço inoxidável, apresenta um volume útil de 2 L e opera em regime de batelada, sendo que uma vez inserido o material dentro do reator, o mesmo é fechado hermeticamente e posicionado no interior de uma mufla com controle de temperatura (Figura 5b).

Assim, para cada batelada de produção dos biocarvões, cerca de 1 kg do biossólido e, 300 g do bagaço de cana-de-açúcar, foram submetidos, separadamente, à temperatura inicial de 50°C, passando por uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹ até atingir a temperatura de 350°C de pirólise, onde permaneceram nesta temperatura por 30 minutos.

A temperatura estabelecida para produção dos biocarvões foi com base em valores encontrados na literatura pertinente. Sendo que a tomada de decisão, quanto a temperatura de 350°C, deve-se ao fato de que para se obter um rendimento de biocarvão aproximado de 20 a 40% o mais indicado é adotar a pirólise lenta, que atua com uma faixa de temperatura mais baixa variando de 300 a 600°C (NOVOTNY *et al.*, 2015). E, também a lignina é de grande importância no rendimento do biocarvão e degrada numa faixa de 280°C a 500°C (REHRAH *et al.*, 2014).

Quanto a definição do tempo da pirólise, foi embasado em estudos anteriores que analisaram o biossólido em diferentes temperaturas e, apontaram um maior rendimento em 300°C por 30 minutos, ou seja, as reações de pirólise foram concluídas dentro de 30 minutos, não havendo necessidade de permanência por longos períodos (LEHMANN; STEPHEN, 2009; SOHI, 2012; HOSSAIN; STREZOV; NELSON, 2009; HOSSAIN *et al.*, 2011; AGRAFIOTI *et al.*, 2013; YUAN *et al.*, 2013; MASEK *et al.*, 2013).

Figura 5 – Sistema de produção de biocarvões



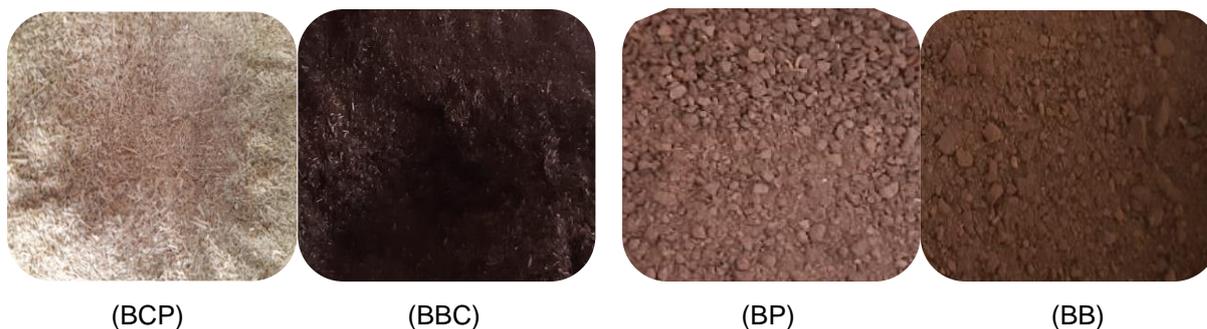
Fonte: A autora.

Legenda: (a) Reator utilizado no processo de produção de biocarvão de biossólido e biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar; (b) Processo de produção de biocarvão de biossólido e biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar.

2.1.2 Etapa 2 – Caracterização das matérias-primas e biocarvões

Para realização da caracterização físico-química dos materiais foi utilizado o delineamento com cinco repetições, sendo que os tratamentos foram constituídos por (Figura 6): biossólido puro (BP); bagaço de cana-de-açúcar puro (BCP); biocarvão de biossólido (BB); biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar (BBC), perfazendo um total de 20 amostras.

Figura 6 – Matérias-primas e seus respectivos biocarvões



Fonte: A autora.

2.1.2.1 Rendimento

Os materiais utilizados no experimento foram pesados antes e após o processo de pirólise em balança Balmak Economic ELC 6/15/30 (Figura 7) para obtenção da massa seca. O rendimento gravimétrico (RG) foi expresso pela relação entre a massa do biocarvão e a massa de biomassa seca (Equação 1).

Figura 7 – Processo de pesagem dos sólidos e líquidos após pirólise



Fonte: A autora.

$$RG = \left(\frac{MC}{MMS} \right) * 100 \quad (1)$$

RG é o rendimento gravimétrico de biocarvão com relação à base seca (%); MC é a massa de biocarvão com relação à base seca (g); MMS é a massa de biomassa seca (g).

O rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso (RGLP), foi o resultado da relação entre a massa do líquido condensado e a massa de biomassa (Eq. 2).

$$RGLP = \left(\frac{MGC}{MMS} \right) * 100 \quad (2)$$

RGLP é o rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso com relação à base seca (%); MGC é a massa do gás condensável (licor) com relação à base seca (g).

Já o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis foi obtido pela subtração dos rendimentos em massa do biocarvão e gás condensado, de um total de 100% (Eq.3).

$$RGNC = 100 - (RG + RGLP) \quad (3)$$

RGNC é o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (%). RG é o rendimento gravimétrico de biocarvão com relação à base seca (%) e RGLP é o rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso com relação à base seca (%).

2.1.2.2 Análise imediatas

As análises imediatas foram realizadas segundo a metodologia descrita em ASTM D1762-84. Por meio desta análise foram determinados os teores de umidade, materiais voláteis e de cinzas e, por diferença, o teor de carbono fixo do material. As mesmas foram realizadas no Laboratório de Química da Universidade do Oeste Paulista.

- Teor de umidade

Primeiramente foi realizado a limpeza dos cadinhos de cerâmica em solução ácida – HCl a 9,5% (Figura 8). Após isso a mufla foi pré-aquecida a 750°C e, os cadinhos foram inseridos e permaneceram lá por 10 min. Com o término do procedimento os cadinhos foram retirados da mufla, com o auxílio de uma pinça de cadinho de aço inox e, levados ao dessecador (Figura 9) para esfriar até atingir a temperatura ambiente. Após o resfriamento utilizou-se uma balança analítica (Modelo AUY220 – SHIMADZU) para determinar a massa dos cadinhos (Figura 10).

Figura 8 – Procedimento de limpeza dos cadinhos com HCl a 9,5%



Fonte: A autora.

Figura 9 – Processo de secagem dos cadinhos em dessecador



Fonte: A autora.

Figura 10 – Balança analítica utilizada para determinação de massa



Fonte: A autora.

Para a determinação da umidade foi inserido 1g das amostras nos cadinhos secos e aplicado o método de secagem em estufa regulada a 105°C. As amostras foram inseridas na estufa e permaneceram nesta temperatura por 2h (Figura 11).

Figura 11 – Processo de secagem para a análise de teor de umidade



Fonte: A autora.

Logo após foram retirados e colocados em um dessecador para esfriar até atingir a temperatura ambiente. Finalizando esta parte deu-se início a pesagem da massa das amostras em balança analítica, mencionada anteriormente, para assim proceder com a determinação da umidade das amostras através da eq.4 (ENDERS *et al.*, 2012):

$$U(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (4)$$

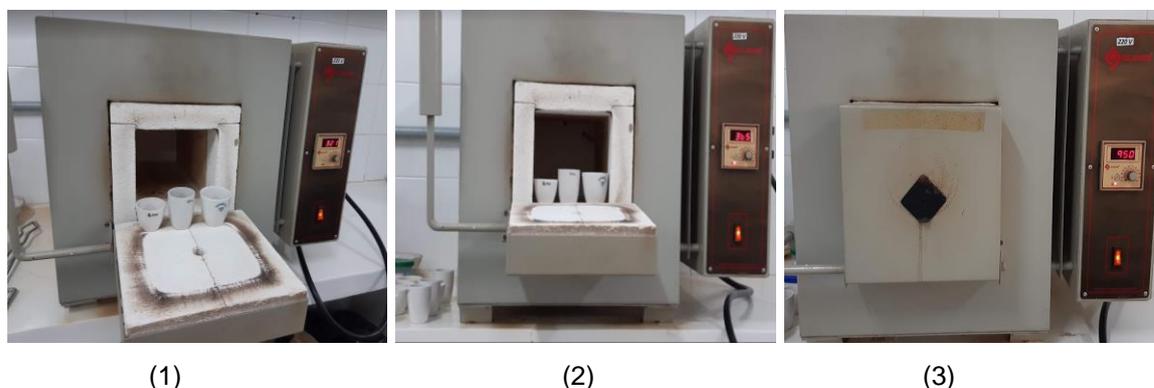
U refere-se à umidade em %; m1 é a massa da amostra antes da secagem em estufa (g); m2 é a massa da amostra após estufa a 105°C (g).

- Teor de materiais voláteis

A determinação de materiais voláteis foi realizada utilizando a amostra submetida ao teste de umidade. Tem-se três etapas para a obtenção do teor de voláteis: (1) Inicialmente com a porta da mufla aberta os cadinhos foram colocados na parte mais externa, até a mesma atingir temperatura de 300°C. Posteriormente os cadinhos permaneceram ali durante 2 minutos; (2) Em seguida foram posicionados na entrada da mufla, ainda com a porta aberta, até a mesma atingir 500°C, permanecendo durante 3 minutos nesta temperatura e; (3) Por fim, os cadinhos foram

inseridos no interior da mufla, com a porta fechada, até atingir a temperatura de 950°C, onde permaneceram por 6 min (Figura 12).

Figura 12 – Análise de determinação de materiais voláteis



Fonte: A autora.

Concluindo este procedimento, os cadinhos com as amostras foram retirados da mufla e colocados no dessecador até atingir temperatura ambiente, para posterior pesagem em balança analítica, procedendo assim com a determinação do teor de materiais voláteis das amostras através da eq.5 (ENDERS *et al.*, 2012):

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m_2} * 100 \quad (5)$$

MV refere-se aos teores de materiais voláteis em %; m₂ é a massa da amostra após estufa a 105°C (g); m₃ é a massa da amostra após aquecimento em mufla a 950°C(g).

- Teor de cinzas

Após completadas as etapas anteriores, deu-se início a determinação do teor de cinzas. Nesta etapa inseriu-se os cadinhos no interior da mufla, até atingir a temperatura de 750°C, onde permaneceram durante 6h. Terminado o procedimento, os cadinhos foram retirados e colocados em um dessecador até atingir temperatura ambiente. O teor de cinzas foi determinado pelo eq. 6 (ENDERS *et al.*, 2012):

$$TC(\%) = \frac{m_4}{m_2} * 100 \quad (6)$$

TC refere-se ao teor de cinzas em %; m4 é a massa após aquecimento em mufla a 750°C (g); m2 é a massa da amostra após estufa a 105°C (g).

- Teor de carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo é uma medida indireta, obtida através da eq.7 (PRADHAN *et al.*, 2020) utilizando os parâmetros previamente determinados.

$$CF(\%) = 100 - (MV + TC)\% \quad (7)$$

CF refere-se ao teor de carbono fixo em %; MV a porcentagem de materiais voláteis; e TC a porcentagem de cinzas.

2.1.2.3 Análise de pH, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica e teor de nutrientes

- pH e condutividade elétrica

As análises de potencial hidrogeniônico (pH) e de condutividade elétrica (C.E.) foram determinadas, segundo a metodologia proposta por Rajkovich *et al.* (2012), em que 1g de amostra foi pesado em erlenmeyers e adicionados 20mL de água deionizada. A mistura foi agitada em mesa agitadora orbital por 1,5h. Após agitação, foi utilizado um pHmetro previamente calibrado, com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0, para determinar os valores de pH das amostras (Figura 13).

Figura 13 – Análise de pH das matérias-primas e seus respectivos biocarvões



Fonte: A autora.

As amostras foram deixadas em repouso e após 12h determinou-se a condutividade elétrica, com o auxílio de um condutímetro previamente calibrado com solução padrão de C.E. igual a 1,4 mS/cm (Figura 14). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Química da UNOESTE.

Figura 14 – Análise de C.E das matérias-primas e seus respectivos biocarvões



Fonte: A autora.

- Capacidade de troca catiônica

A capacidade de troca de cátions (CTC) das amostras foram determinadas seguindo a metodologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para fertilizantes orgânicos (BRASIL, 2007), sendo realizada no Laboratório de Química da Universidade do Oeste Paulista. Onde pesou-se 5g de amostra e 2g de carvão ativado em erlenmeyer com capacidade para 250mL (Figura 15), no qual foram adicionados 100mL de HCl 0,5 M.

Figura 15 – Primeira parte da análise de CTC



Fonte: A autora.

A mistura foi agitada por 30 min no agitador de Wagner e, em seguida, filtrada em sistema de vácuo (papel filtro de 2 micras) e lavada com água destilada por 10 vezes até completar o volume de 300 ml, sendo descartado posteriormente. Sobre o material retido no filtro foram adicionados 100 ml de solução de acetato de cálcio (CaOAc , $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, pH igual a 7) em porções de 10 ml (Figura 16).

Figura 16 – Segunda parte da análise de CTC



Fonte: A autora.

Novamente foram realizadas sucessivas lavagens do material retido com água destilada até completar o volume de 300 ml. A solução final foi titulada com NaOH ($0,1 \text{ M}$) padronizado, incluindo o tratamento branco, em que não foi adicionada amostra, somente 2g de carvão ativado. A CTC foi calculada por meio da eq.8:

$$CTC \left(\frac{\text{mmolc}}{\text{kg}} \right) = \frac{(V_a - V_b) * 0,1 * 1000}{m(g)} \quad (8)$$

V_a refere-se ao volume de NaOH utilizado para neutralizar a amostra (mL); V_b volume de NaOH utilizado para neutralizar o branco (mL); m a massa de amostra (g).

- Teor de macro e micronutrientes

Para realização da análise de teor de nutrientes (N, P, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn) e matéria orgânica as amostras foram enviadas ao Laboratório de Tecidos Vegetais da Universidade do Oeste Paulista. Onde os teores de nutrientes foram determinados, conforme métodos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), por

meio da técnica de espectrometria de absorção atômica, espectrômetro de UV- visível a 420 nm e fotômetro de chama. Os teores de macronutrientes foram expressos em g kg⁻¹ e os de micronutrientes em mg kg⁻¹.

2.1.2.4 Espectrometria de fluorescência de raio X

A FRX destaca-se por ser uma técnica não destrutiva que permite determinar a concentração de elementos em uma amostra utilizando intensidades de raios X. Isto é, de modo instrumental sem nenhum pré-tratamento químico e podendo atingir limites de detecção da ordem de 1 a 20 ppm. Possibilitando a determinação simultânea ou sequencial da concentração de elementos enquadrados entre o sódio e urânio – Na e U (WASTOWSKI *et al.*, 2010).

As amostras foram enviadas ao Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos – LCGRS/Laboratório de Materiais Cerâmicos – LaMaC da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Presidente Prudente - SP para ser realizada a análise de Espectrometria de Fluorescência de Raio X (FRX).

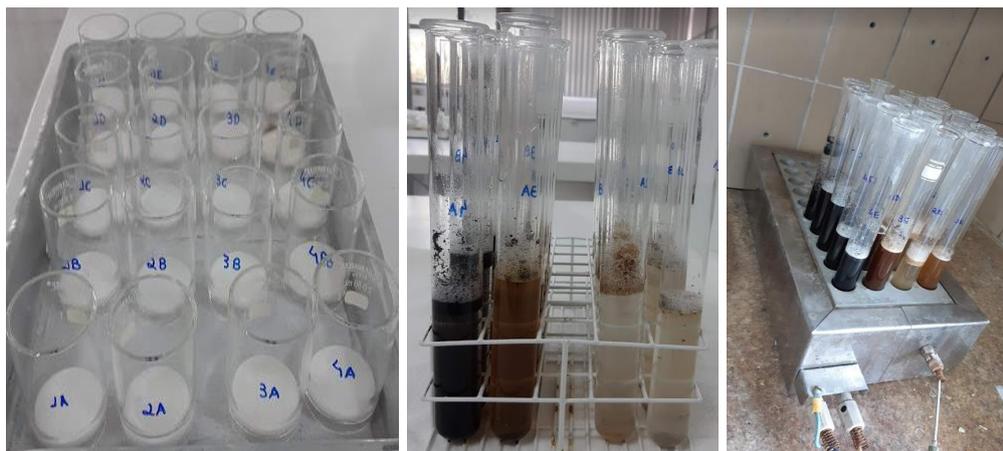
A composição química das amostras, ou seja, a quantificação da proporção entre os elementos presentes nas amostras, comparativamente, foi realizada pelo método semi-quantitativo de FRX. Utilizou o equipamento FRX, modelo EDX 7000, marca Shimadzu, os valores aproximados das porcentagens dos óxidos mais estáveis de cada elemento foram obtidas utilizando uma fonte de Rh para as excitações. As varreduras foram realizadas no intervalo de energia dos óxidos do Na até o U em condições normais de temperatura e pressão. Foi utilizado um porta amostra de poliéster biaxialmente-orientado de politereftalato de etileno (boPET, Mylar®) e uma área de aproximadamente 80 mm² foi analisada.

2.1.2.5 Análise bromatológica

A análise bromatológica foi realizada no Laboratório de Nutrição Animal da Universidade do Oeste Paulista com finalidade de observar se houve alterações nos teores de hemicelulose, celulose e lignina no biossólido, bagaço de cana-de-açúcar e seus respectivos biocarvões. A metodologia utilizada foi a de Silva e Queiroz (2006), que é baseada na solubilidade em solução de detergente: Fibra de Detergente Ácido (FDAC) e Fibra de Detergente Neutro (FDN).

Foi realizado o método de solução em FDN, utilizou-se cadinhos de vidro com placa porosa, onde primeiramente foram pesados e identificados para posterior uso. Pesou-se 0,35 g de amostra em tubos de ensaio de 100 mL, logo após adicionou-se 35 mL de solução de detergente neutro em cada amostra. Os tubos foram levados para o bloco digestor onde permaneceram por 1h a 125°C (Figura 17).

Figura 17 – Primeira parte da análise de FDN e FDAC



Fonte: A autora.

Concluído esta parte deu-se início ao processo de filtragem, em cadinhos com auxílio de uma bomba a vácuo, sendo realizada com água numa temperatura de 100°C e, finalizada com acetona. Posteriormente as amostras foram levadas a estufa por um período de 6h, finalizado este processo os cadinhos foram acondicionados em dessecador até que as amostras esfriassem e posteriormente pesados em balança analítica, Modelo Scientech VER210 (Figura 18).

Figura 18 – Segunda parte da análise de FDN e FDAC



Fonte: A autora.

O FDAC foi realizado para obtenção dos teores de lignina e celulose, sendo que é o mesmo procedimento do FDN, só muda a solução que é detergente ácido e, após a pesagem dos cadinhos que ficaram durante 6h na estufa adicionou-se ácido sulfúrico a 72% e as amostras ficaram em repouso durante 3h. Em seguida, fez-se a lavagem filtrando e foram inseridas em estufa a 105°C por 6h (Figura 19). As mesmas foram pesadas novamente e, enviadas a mufla a 600°C durante 6h, ao dessecador e por fim pesou-se. Tanto o FDN quanto o FDAC podem ser obtidos pela eq. 9:

$$\%FDN \text{ ou } \%FDAC = \frac{[(\text{Peso do cadinho} + \text{Amostra}) - (\text{Peso do cadinho vazio})] * 100}{\text{Peso da amostra (g)}}$$

Figura 19 – Terceira parte da análise de FDAC



Fonte: A autora.

No FDN os componentes hemicelulose, celulose e lignina estão insolúveis. Já na FDAC solubiliza-se a hemicelulose e o resíduo é tratado com ácido sulfúrico para extração da lignina. A diferença entre as frações é que determina os teores de hemicelulose, celulose e lignina (CONZ *et al.*, 2017).

2.1.2.6 Determinação da densidade e tamanho de partículas ou agregados

- Densidade de partículas ou agregados

Para a determinação da densidade de partículas (D_p), foi utilizado 20 g das amostras (seco a 105°C). O material foi adicionado em um balão volumétrico de 50 mL que, posteriormente, foi completado com álcool etílico P.A até atingir seu volume total (EMBRAPA, 1997). Sendo que para medir o volume de álcool gasto, para completar o balão, utilizou-se uma bureta (Figura 20).

Figura 20 – Análise de determinação da densidade de partículas dos materiais



Fonte: A autora.

Faz-se aqui uma pequena observação em relação ao tamanho do balão, pois para o bagaço de cana-de-açúcar e seu respectivo biocarvão foi necessário utilizar balão volumétrico de 200mL, devido a serem materiais muito leves. E, antes de iniciar a análise os balões foram aferidos com água deionizada. O cálculo final da D_p se deu pela eq.10.

$$D_p \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa da amostra seca a } 105^\circ\text{C (g)}}{\text{Volume do balão aferido (mL) - Volume de álcool gasto (mL)}} \quad (10)$$

- Tamanho de partículas ou agregados

Foi utilizado em cada procedimento 100 gramas de amostra, onde foram colocados na parte superior de um jogo contendo 5 peneiras com as seguintes malhas: 2; 1,19; 0,59; 0,25 e 0,149 mm. As peneiras foram submetidas a um agitador de peneiras a 10 rpm por 15 minutos (Figura 21).

Figura 21 – Determinação das frações granulométricas dos materiais



Fonte: A autora.

Em seguida o material retido em cada peneira foi transferido para um recipiente numerado e de peso conhecido e levado para uma estufa para determinação do peso a 105°C. Uma outra amostra de 100 gramas também foi levada para estufa para a determinação do seu peso a 105°C para utilização no cálculo das frações granulométricas segundo a eq.11 (ADAPTADA ASTM D2862-10).

$$\text{Teor de Agregados} = 100 * \left(\frac{A}{B}\right) \quad (11)$$

A refere-se ao peso dos agregados secos a 105°C retidos respectivamente em cada uma das peneiras e B ao peso da amostra seca a 105°C.

2.1.2.7 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo programa SISVAR. Para comparação de médias, foi utilizado o teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). A correlação de Pearson foi feita pelo software R e utilizado o teste t a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

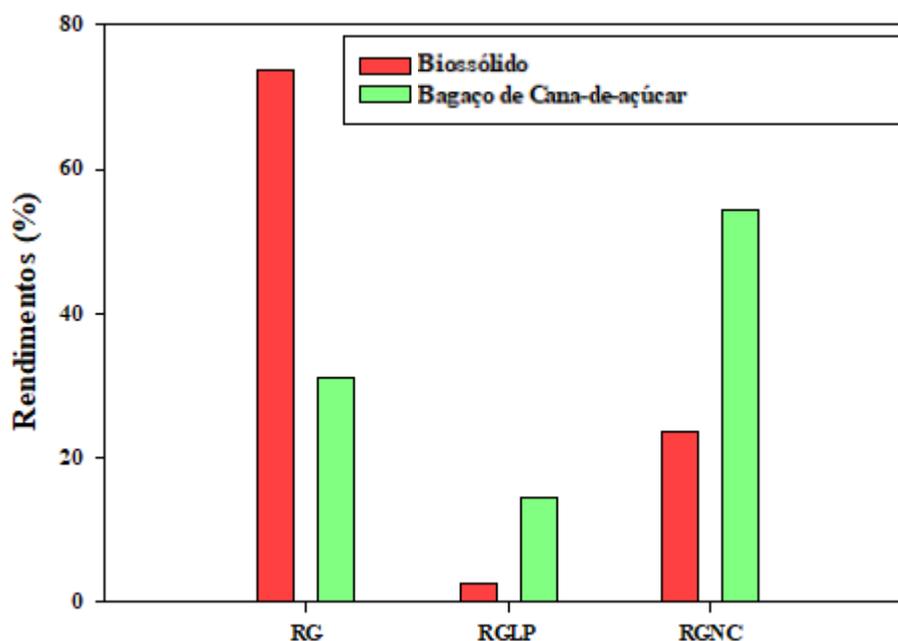
3.1 Rendimento

O BB apresentou um rendimento gravimétrico (RG) de 73,8% quando comparado ao BBC, 31,1 % (Figura 22). Essa maior perda de massa no BBC pode estar relacionada ao alto teor de celulose na biomassa, que é facilmente degradada na faixa de 250°C a 300°C durante a pirólise (DOMINGUES *et al.*, 2017).

Os valores encontrados no presente trabalho são próximos aos de Xue *et al.* (2019), que trabalhando com temperaturas e tempos variados obtiveram um RG de 89,70%, a 300°C durante 30 min, para biocarvão produzido através de lodo de esgoto. E assemelham-se aos de Domingues *et al.* (2017), que estudando diferentes biomassas, trabalharam com bagaço de cana-de-açúcar pirolisado a 350°C e, encontraram um rendimento gravimétrico de 37,5%.

O gráfico abaixo evidencia ainda maiores valores de rendimento gravimétrico de licor pirolenhoso (RGLP) e gases não condensáveis (RGNC) para o BBC – 14,4% e 54,5%, enquanto o BB apresentou apenas 2,5% de RGLP e 23,7% de RGNC.

Figura 22 – Rendimento dos materiais pirolisados a 350°C por 30 minutos.



Fonte: A autora.

Legenda: RG: Rendimento Gravimétrico (Sólido) ; RGLP: Rendimento Gravimétrico de Licor Pirolenhoso (Líquido); RGNC: Rendimento Gravimétrico de Gases Não Condensáveis (Gás)

3.2 Análise imediata

Em relação a umidade nota-se que o BB e BBC apresentaram menores valores (Tabela 1), não ultrapassando 2% quando comparados ao BP e BCP. O que já era esperado, pois a partir de 120°C a matéria-prima começa a sofrer modificações perdendo umidade durante o processo de pirólise (DOWNIE; CRSOCKY; MUNROE, 2009; CONZ *et al.*, 2017).

Para o material volátil (MV) os maiores valores foram obtidos no BCP e BBC, 95,49% e 89,68%, comparado aos demais. Pereira e Seye (2014) em seu estudo sobre características e reais potencialidades energéticas de algumas biomassas residuais, encontraram valor de 80,42% de material volátil no bagaço de cana-de-açúcar. E, Zhang *et al.* (2017) encontraram 60% de MV no bagaço pirolisado a 350°C. Valores esses menores que os encontrados no presente trabalho.

Conz *et al.* (2017) encontraram valores, próximos ao do presente estudo, de 90,61%, 93,56% para a palha de cana-de-açúcar e serragem materiais esses que podem ser comparados ao bagaço de cana-de-açúcar. E, trabalhando com a temperatura de 350°C, o teor de material volátil foi de 50,15% e 54,02% dos materiais anteriormente citados. Os autores ainda trabalham com dejetos de galinha, resíduo

este que se assemelha ao biossólido, onde obtém valor de 69,70% para biomassa e 60,80% de MV para o biocarvão.

Quanto ao teor de cinzas (TC) notou-se um aumento dos valores nos materiais pirolisados em comparação com as biomassas. O BB obteve um valor de 53,20%, já o BBC foi de 10,23%.

Esse maior valor de cinza presentes no BB, pode estar relacionado com a matéria-prima utilizada para produção do biocarvão, pois Zhao *et al.* (2013) mencionam que a composição da matéria-prima pode influenciar, sendo que quanto maior a quantidade de nutrientes mais elevado será o teor de cinzas. Os autores evidenciaram um maior teor de cinzas em biocarvão de lodo e biocarvão de estrume de vaca e, relacionaram isso à alta concentração de constituintes minerais na matéria-prima. Cao e Harris (2010) estudando as propriedades do biocarvão de estrume observaram um valor de 96% no teor de cinzas e, associaram esse maior valor a presença de minerais como a calcita e quartzo no estrume.

Alguns estudos com resíduos orgânicos, como o de Conz *et al.* (2017) que trabalhando com dejetos de galinha encontraram um valor de 38,21% a 350°C e para a biomassa obteve um valor de 29,71%. E Bleuler *et al.* (2020) encontram um valor de 8,2% para o lodo e 42% no biocarvão em temperaturas de 500 e 650°C. O valor encontrado no presente estudo, para o biossólido e seu respectivo biocarvão, de teor de cinzas foi superior, quando comparado ao dejetos de galinha.

O BCP obteve um teor de cinzas de 4,46%, corroborando com Toscan *et al.* (2017), que em seu trabalho evidenciaram um valor de 4,5% de cinzas para o bagaço de cana-de-açúcar. Já Kameyama *et al.* (2016) encontraram um valor de 6% no biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar produzido a 400°C, enquanto no presente estudo o BBC produzido a 350°C apresentou um valor de 10,23% de cinzas.

O carbono fixo (CF) vem a ser a parte do material mais resistente que permanece no biocarvão após a pirólise (AMONETTE; JOSEPH, 2009; CONZ *et al.*, 2017). O BB obteve maior valor, apresentando significância em relação aos demais. O valor encontrado no presente trabalho, corrobora com estudo de Agrafioti *et al.* (2013) que encontraram um valor próximo de 0,4% de carbono fixo no biossólido pirolisado a 300°C.

Já Conz *et al.* (2017) trabalhando há uma temperatura de 350°C com dejetos de galinha, palha de cana-de-açúcar e serragem encontraram valor de 0% para ambas biomassas e, de 0%, 21,86% e 41,45% para os biocarvões. Valores estes que se

aproximaram dos achados no presente estudo, principalmente para o BP, mas diferiram dos BB e BBC. Esses baixos valores de CF podem estar relacionados ao alto teor de voláteis e cinzas.

Tabela 1 – Valores de umidade, material volátil, teor de cinzas e carbono fixo nas matérias-primas e seus respectivos biocarvões

Tratamentos ¹	Umidade	Material Volátil	Teor de Cinzas	Carbono Fixo
	------(%)-----			
BP	7,87a	57,46c	42,31b	0,23b
BCP	5,75b	95,49a	4,46d	0,05c
BB	1,60c	46,12d	53,20a	0,68a
BBC	1,99c	89,68b	10,23c	0,09bc

Fonte: A autora.

Legenda: ¹BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tuckey a 5%.

3.3 Determinação do pH, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica e teor de nutrientes

De forma geral, quando se comparou as matérias-primas e seus respectivos biocarvões observou-se que ambos apresentaram uma faixa de pH mais neutro/alcalino, sendo que o BP obteve um valor mais elevado (Tabela 2). Esse maior valor do pH no BP, pode estar relacionado ao tratamento com cal virgem dolomítico com óxido de cálcio, que esse resíduo normalmente recebe na maioria das ETE's, com finalidade de eliminar ou reduzir os patógenos (BARROS *et al.*, 2011).

O biocarvão de biossólido apresentou um valor mais elevado de 9,64 em comparação ao BBC, 8,11. Isso pode estar relacionado com a matéria-prima, pois segundo Lehmann *et al.* (2011), biocarvões produzidos a partir de produtos não madeireiros possuem um pH mais elevado, isso pode ocorrer devido a presença de espécies químicas, carbonatos e outros sais. Zhao *et al.* (2013) em seu estudo sobre propriedades de biocarvão com lodo de águas residuárias, encontrou valor de pH de 8,82. Valor este próximo ao obtido no presente trabalho.

O pH do solo é um importante parâmetro, pois desempenha um papel crucial no ciclo de nutrientes e na translocação de elementos potencialmente tóxicos

(CHEN *et al.*, 2021). Além disso, afeta também os microrganismos presentes no solo e os vegetais (BRADY; WEIL, 2013), por serem sensíveis ao seu ambiente químico.

Sabe-se que os solos na região do Oeste Paulista possuem um pH mais ácido, que varia de 4,5 a 5,5. Nessas condições a calagem se torna necessária no solo, pois um pH ácido contribui para a presença de alumínio, que é um elemento tóxico para as plantas. Sendo que uma faixa de pH ideal para disponibilidade de nutrientes para as plantas e para atividade dos microrganismos do solo, situa-se entre 6,0 a 6,5. Então, nesse caso os tratamentos mais indicados para a inserção no solo seriam o BP, BB e BBC, por apresentarem um pH alcalino, poderiam agir como um corretor deste parâmetro.

Os valores mais elevados de condutividade elétrica foram encontrados no BP e BB. E eles estão relacionados ao conteúdo de nutrientes presentes na matéria-prima, sendo que biocarvões provenientes de resíduos animais contêm maiores valores (CONZ *et al.*, 2017; JOSEPH *et al.*, 2010; SINGH; SINGH; COWIE, 2010).

Já para a matéria orgânica, carbono orgânico e relação C/N o bagaço de cana-de-açúcar obteve maiores valores, pois é um resíduo lignocelulósico rico em carbono. Porém, para o nitrogênio (N) apresentou menores valores, devido a isso evidenciou uma relação C/N alta. Caires (2000) menciona que uma relação C/N elevada vem a ser superior a 30/1. E, normalmente isso pode indicar uma deficiência de N o que poderá afetar todo metabolismo vegetal, visto que a planta utiliza o N para fabricar aminoácidos e, a partir desses, proteínas, enzimas e diversos compostos secundários (TOMÉ JR, 1997).

O bio sólido e seu respectivo biocarvão evidenciaram valores mais elevados de N-total, corroborando com os achados da literatura e, uma relação C/N menor que 10/1. Essa baixa relação C/N pode indicar um equilíbrio entre os elementos de carbono e nitrogênio (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Os valores encontrados no presente trabalho corroboram com Hossain *et al.* (2011), que achou valores de 3,27% para o bio sólido e 3,32% de N após a pirólise a 300°C e valores aproximados para o C (32,3% e 25,5%). E Pituello *et al.* (2015) que encontraram valor de 3,6% de N no lodo de esgoto pirolisado a 350°C.

A diminuição do C após o processo de pirólise pode estar relacionado a perda por volatilização dos elementos como CO, CO₂, H₂O e hidrocarboneto. Quanto ao N pode ocorrer a perda por volatilização do NH₄-N ou NO₃-N (SOUZA *et al.*, 2021).

Conz *et al.* (2017) encontraram valores de C de aproximadamente 50% na serragem e, após a pirólise a 350°C obtiveram valores de 70% desse elemento. Já para o dejetto de galinha estudado pelos autores, os valores foram de 30% e, a 350°C, 40% de C. Para o N, o dejetto de galinha apresentou valor de 3% e após a pirólise, aproximadamente 2,5%. E, a serragem 0,1% e seu biocarvão 0,3% de N. Valores estes que se aproximaram dos obtidos no presente trabalho.

A CTC também apresentou maiores valores para o BP e BB. Ela é de suma importância, principalmente em relação a fertilidade do solo, pois indica a capacidade total de reter cátions, que posteriormente tornar-se-ão disponíveis as plantas (SOUZA; LIMA; TEIXEIRA, 2009). Por mais que a matéria-prima apresentou maior valor que o biocarvão em ambos, deve-se levar em conta que a matéria-prima vai degradar mais rápido que o biocarvão, pois o mesmo tem maior persistência no solo podendo contribuir por mais tempo (PETTER; MADARI, 2012).

Dentre os parâmetros apresentados na Tabela 2 nota-se ainda que apenas o pH, nitrogênio total e a condutividade elétrica obtiveram aumento após a pirólise a 350°C do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 2 – Valores de pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, carbono orgânico, nitrogênio total, relação C/N e capacidade de troca catiônica nas matérias-primas e seus respectivos biocarvões

Tratamentos ¹	pH	CE	MO	C.Org	N-Total	C/N	CTC
		μS	----- g dm ⁻³ -----		g kg ⁻¹		mmol _c kg ⁻¹
BP	12,02a	1498,60a	460,54c	255,86c	36,62a	7,00c	865,93a
BCP	6,10d	266,48d	925,92a	514,40a	2,32c	221,72a	112,39c
BB	9,64b	1036,00b	327,52d	181,96d	27,52b	6,61c	725,14b
BBC	8,11c	291,40c	864,75b	480,40b	4,92c	97,64b	52,00d
CV (%)	1,00	2,09	3,29	3,29	5,45	5,88	2,44
DMS	0,15	22,24	39,73	22,09	2,88	14,75	23,04

Fonte: A autora.

Legenda: ¹BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tuckey a 5%.

Os elementos presentes na Tabela 3, são classificados como macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn). Esses nutrientes são

essenciais as plantas, pois estão ligados em processos metabólicos que ocorrem no citoplasma das células das plantas (TOMÉ JR, 1997).

De modo geral notou-se um aumento no teor dos macronutrientes após o processo de pirólise, com exceção do enxofre (BB). Cantrell *et al.* (2012) trabalhando com cinco tipos de biomassas (esterços de animais) em três temperaturas de pirólise (0°C, 350°C e 700°C) evidenciaram que a elevação da temperatura, no processo de conversão da matéria-prima em biocarvão, ocasionou um aumento no teor de nutrientes. Esses autores observaram aumentos no teor de cinzas e carbono fixo e, redução de materiais voláteis comparando as biomassas aos biocarvões produzidos, corroborando com o presente estudo.

Já em relação aos micronutrientes, o Fe foi o único elemento que evidenciou uma redução após a pirólise a 350°C do bio sólido, o mesmo não foi observado para os valores do BBC.

O BB apresentou maiores valores em relação ao P, Ca, Mg, Cu, Mn e Zn, porém o teor de P, Ca, Mg e Zn não apresentaram significância do BP. Resultados esses que corroboram com Conz *et al.* (2017), que encontrou incremento dos valores desses elementos trabalhando com dejetos de galinha a 350°C, material este que se assemelha com o bio sólido pirolisado.

Já o bagaço de cana-de-açúcar pirolisado obteve maior teor apenas para o K. Corroborando com Zhao *et al.* (2013), que evidenciaram em seu trabalho, onde estudaram doze tipos de matéria-prima para transformação em biocarvão, que resíduos de culturas agrícolas como a palha de trigo, tiveram maior concentração de K. Enquanto o lodo de esgoto obteve um valor de Fe e Ca mais elevados.

Zelaya *et al.* (2019) em seu estudo com biocarvão produzido partir de lodo de esgoto e bagaço de cana-de-açúcar a 450°C encontraram valores superiores de K (BB= 3,1 e BCP=3,0 g kg⁻¹), exceto para o BP (1,8 g kg⁻¹). Valor este próximo ao encontrado no presente estudo. Hossain *et al.* (2011) evidenciaram em seu trabalho com bio sólido e biocarvão, produzido a 300°C, valores superiores para o Ca (BP= 3,02% e BB=3,47%) e inferiores de Mg (BP=0,33% e BB=0,35%) aos observados no presente estudo.

Tabela 3 – Valores dos nutrientes nas matérias-primas e seus respectivos biocarvões

Tratamentos ¹	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----(g kg^{-1})-----					-----(mg kg^{-1})-----			
BP	5,16a	1,78b	13,94a	6,52a	3,66a	129,66b	5.775,47a	85,94b	370,22a
BCP	0,38b	2,24b	0,50b	0,46c	0,50b	10,38d	878,12d	36,84c	31,06b
BB	5,69a	1,90b	14,58a	6,82a	3,50a	157,16a	5.315,18b	108,10a	386,10a
BBC	0,62b	5,46a	0,64b	1,60b	0,70b	17,44c	1.478,24c	87,03b	51,44b
CV(%)	11,97	9,56	24,26	11,63	21,02	5,01	2,40	4,77	14,04
DMS	0,89	0,54	4,57	0,93	1,16	6,19	165,14	6,61	60,80

Fonte: A autora.

Legenda: ¹BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S: Enxofre; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco.

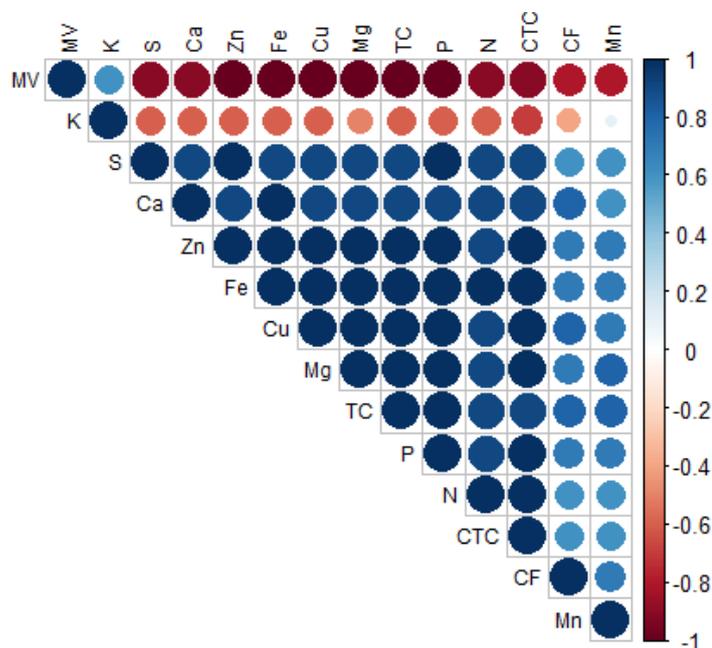
Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tuckey a 5%.

Analisando a matriz de correlação de Pearson (Figura 23), notou-se que o teor cinzas apresentou uma correlação positiva forte, variando de 0,8 a 1, com a maioria dos nutrientes presentes nos materiais estudados, exceto para o K ($r = -0,6$). Ou seja, à medida que eleva o teor de cinzas, há um aumento dos nutrientes.

O teor de cinzas ainda evidenciou correlação negativa forte com voláteis ($r = -1$). Indicando que materiais com alto teor de MV vão ter uma quantidade reduzida de TC, o que pode influenciar diretamente na quantidade de nutrientes.

Observa-se que voláteis apresentou correlação negativa para maioria dos nutrientes, exceto para o K ($r = 0,6$). O K evidenciou ainda uma correlação positiva fraca de 0,1 com o Mn.

Figura 23 – Matriz de correlação de Pearson entre o teor de nutrientes, voláteis, cinzas, carbono fixo e CTC nas matérias-primas e biocarvões



Fonte: A autora.

Legenda: N: Nitrogênio total; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S: Enxofre; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco. Cores azuis e vermelhas indicam correlações positivas e negativas, respectivamente. Espaços vazios indicam que as correlações não são estatisticamente significativas a $p < 0,05$, teste t.

3.4 Espectrometria de fluorescência de raio X

Observou-se que no biossólido os elementos mais representativos foram C, Ca, Si, Fe, S, Al, P, Ti e K (Tabela 4). Sendo que a soma das concentrações atingiram 99,81%. Enquanto Zn, Sr, Cu, Cr, Mn, Zr e Nb apresentaram valores de 0,19%. Sendo que após a pirólise do biossólido houve um decréscimo de 0,21% (C, Ca, Si, Fe, S, Al, P, Ti e K) e 0,11% (Zn, Sr, Cu, Cr, Mn, Zr). Notou-se ainda que o carbono foi o único elemento que teve um incremento de aproximadamente 10% no biocarvão. No BB foi identificado ainda o Br e, a ausência do Nb.

Já para o bagaço de cana-de-açúcar verificou-se valores consideráveis de C, Si, K, Mg, S, Ca, Al, P e Fe com concentração de 99,97%. Já para Ti, Cu, Zn, Mn e Cr foi de 0,03%. No biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar observou-se uma redução de aproximadamente 3,57% no teor de carbono e, um aumento nos demais elementos, com exceção do Cr que se mostrou ausente, enquanto foi identificado baixas concentrações de Sr. Constatou-se um incremento de 1,4% de Si e 0,9% de K no BBC.

Tabela 4 – Valores de elementos químicos presentes nos materiais (%)

Elementos	BP	BCP	BB	BBC
C	76,194	98,323	86,196	94,748
Mg	-	0,232	-	0,386
Al	0,585	0,086	0,467	0,396
Si	1,864	0,715	1,144	2,122
P	0,439	0,085	0,230	0,240
S	0,666	0,127	0,363	0,247
K	0,173	0,227	0,109	1,124
Ca	18,923	0,101	11,001	0,475
Ti	0,199	0,013	0,085	0,037
Cr	0,013	0,002	0,004	-
Mn	0,011	0,004	0,005	0,018
Fe	0,767	0,077	0,325	0,194
Cu	0,025	0,006	0,011	0,008
Zn	0,065	0,003	0,028	0,005
Br	-	-	0,001	-
Sr	0,063	-	0,029	0,002
Zr	0,008	-	0,003	-
Nb	0,004	-	-	-

Fonte: A autora.

Legenda: BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. C: Carbono; Mg: Magnésio; Al: Alumínio; Si: Sílica; P: Fósforo; S: Enxofre; K: Potássio; Ca: Cálcio; Ti: Titânio; Cr: Cromo; Mn: Manganês; Fe: Ferro; Cu: Cobre; Zn: Zinco; Br: Bromo; Sr: Estrôncio; Zr: Zircônio; Nb: Nióbio

3.5 Análise bromatológica

O bagaço de cana-de-açúcar evidenciou maiores teores de hemicelulose (23,65%) e celulose (55,51%) diferindo dos demais tratamentos. Corroborando com Pandey *et al.* (2000), pois segundo os autores o bagaço é um material composto, principalmente, por 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina. Li e Jiang (2017) e Xing, Xu e Li (2021) mencionam que a matéria-prima é composta basicamente por polímeros aromáticos, lignina. E, polímeros de carboidratos, celulose e hemicelulose.

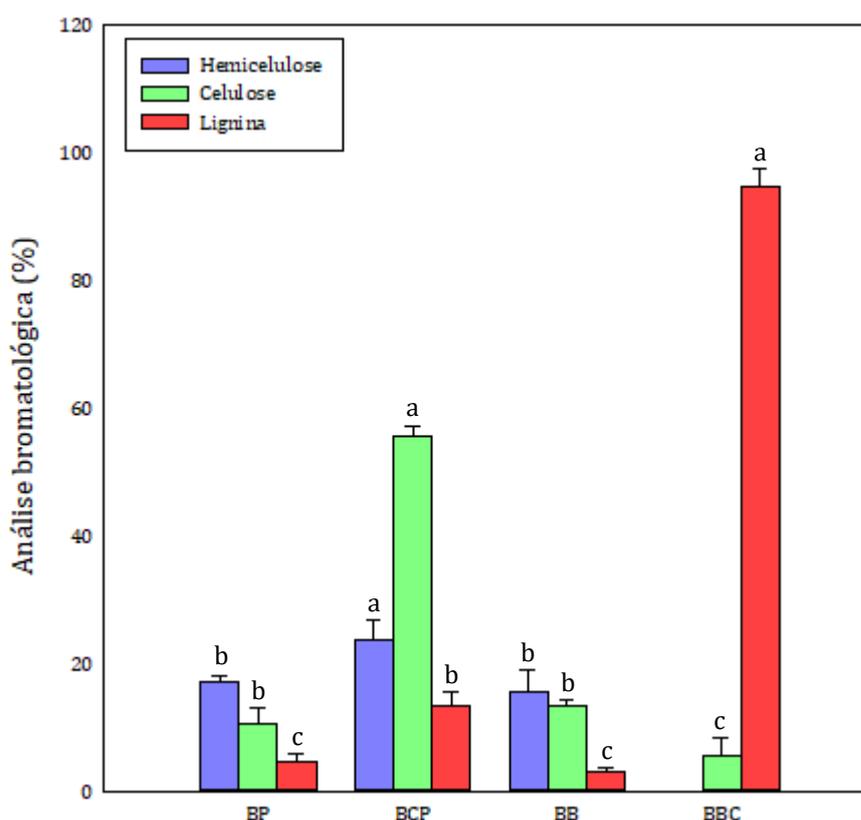
Toscan *et al.* (2017) em seu estudo sobre a composição de biomassas lignocelulósicas obtiveram valores de 40,1% de celulose e, 32,3% de hemicelulose para o bagaço de cana-de-açúcar. Já Velmurugan e Muthukumar (2012) encontraram valores de lignina, no bagaço, de 17,1%. Valores próximos aos do presente estudo.

Observou-se também que após o processo de pirólise lenta, o BBC obteve um alto teor de lignina, 94,44% (Figura 24) podendo estar relacionado a uma maior recalcitrância do material, pois a lignina é muito mais recalcitrante do que a celulose

e hemicelulose durante o processo de carbonização (RUTHERFORD *et al.*, 2012). Pois, o bagaço de cana-de-açúcar durante o processo de pirólise, ao atingir 120°C, começa a sofrer decomposição térmica com perda de umidade e rompimento de ligações químicas. Ocorrendo a degradação da hemicelulose (200°C a 260°C), celulose (240°C a 350°C) e lignina (280°C a 500°C) (REHRAH *et al.*, 2014).

Esse elevado teor de lignina também foi encontrado por Conz *et al.* (2017) em biocarvões produzidos a partir de serragem (aproximadamente 90%) e palha de cana-de-açúcar a 350°C (aproximadamente 85%).

Figura 24 – Análise bromatológica das matérias-primas e biocarvões



Fonte: A autora.

Legenda: BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tuckey a 5%.

3.6 Densidade e tamanho de partículas ou agregados

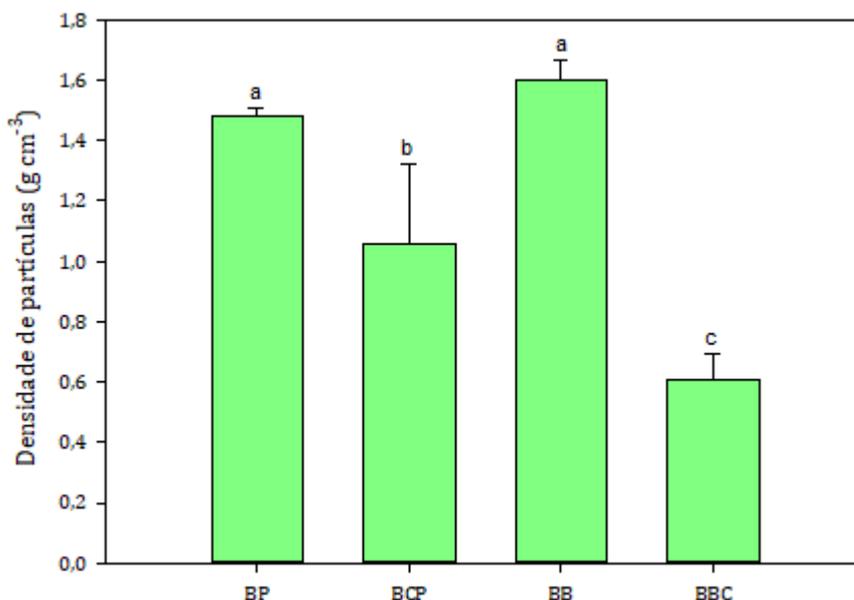
O bagaço de cana-de-açúcar e seu respectivo biocarvão apresentaram menores valores, quando comparados ao BP e BB (Figura 25).

Após a pirólise a 350°C notou-se uma redução da densidade de partículas no bagaço pirolisado ($1,06 \text{ g cm}^{-3}$ – $0,61 \text{ g cm}^{-3}$). O aumento da temperatura de pirólise pode causar uma diminuição da densidade, isso até aproximadamente 900°C, pois a partir dessa temperatura há uma transformação térmica que pode provocar uma ruptura na estrutura do material (biocarvão), fazendo com que a densidade aumente (DOWNIE; CROSKY; MUNROE, 2009). Dessa forma, pode-se dizer que a densidade de partículas do biocarvão, assim como outras características, depende tanto da matéria-prima quanto das condições de pirólise (PANDOLFO; AMINI-AMOLI; KILLINGLEY, 1994; LEHMANN; JOSEPH, 2015).

De acordo com a Figura 25, o bagaço de cana-de-açúcar apresentou uma menor densidade de partículas que o biossólido ($1,48 \text{ g cm}^{-3}$ – $1,80 \text{ g cm}^{-3}$). Isso pode estar relacionado a perda de líquido pirolenhoso e gases ter sido maior (68,9%), quando comparado ao biossólido. Pois durante a degradação térmica as estruturas mais rígidas vão sendo preservadas, enquanto outras são transformadas em líquido ou volatilizadas, o que faz com que fique mais espaços porosos.

Como a porosidade é o inverso da densidade, Downie, Croscky e Munroe (2009) pressupõem que há um aumento da porosidade até aproximadamente 900°C, porém a partir dessa temperatura ocorre uma perda da porosidade ocasionando um aumento na densidade dos materiais. Sendo que o aumento da temperatura de pirólise pode aumentar a aromaticidade e, conseqüentemente a geração de macroporos e microporos, que estão relacionados a maiores áreas específicas no biocarvão (YUAN *et al.*, 2013).

Figura 25 – Densidade de partículas das matérias-primas e biocarvões



Fonte: A autora.

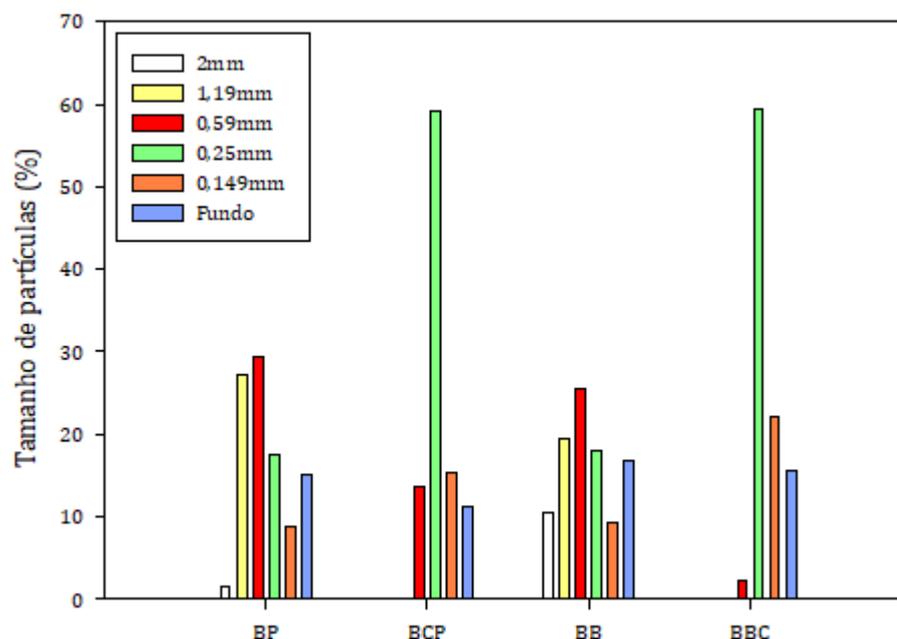
Legenda: BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tuckey a 5%.

Observando os valores na Figura 26, notou-se que o biossólido apresentou em sua maioria partículas e/ou agregados de 0,59mm (29,3%) e, 1,19mm (27,1%). Já para o BB houve um acréscimo nas partículas de 2mm, onde foi de 1,6% para 10,4%.

Quanto ao BCP e o BBC, não apresentaram partículas de 2mm e 1,19mm de acordo com a análise de teor de partículas. Porém, evidenciou-se uma diferença em relação ao valor das partículas a 0,59mm, onde na matéria-prima se encontrava com 13,7% e após a pirólise esse valor decaiu para 2,4%. Houve também um aumento no valor das partículas de 0,149mm (15,3% - 22,1%).

Sabe-se que as partículas de menor dimensão apresentam uma maior superfície de contato com o solo, o que torna mais fácil as reações de degradação, podendo ainda afetar a persistência do material no sistema solo (LORENZ; LAL, 2014). Kim *et al.* (2012) mencionam que se aumenta a quantidade de partículas de dimensão menores, quando se eleva a temperatura de pirólise, pois esse aumento da temperatura pode enfraquecer a estrutura molecular do material.

Figura 26 – Distribuição do tamanho de partículas das matérias-primas e biocarvões



Fonte: A autora.

Legenda: BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tuckey a 5%.

4 CONCLUSÃO

O biocarvão de biossólido evidenciou maiores valores de nutrientes quando comparado ao biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar. Apresentando uma CTC alta de $725,14 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, parâmetro este de suma importância em relação a fertilidade do solo.

Quanto ao pH notou-se que o BP e o BB apresentaram pH alcalino podendo estar relacionado a quantidade de Ca presente no material. De modo que ambos podem vir a ser utilizados como corretivo de solos, visto que, a calagem com calcário normalmente é realizada com intuito de diminuir a acidez do solo, fornecer Ca e Mg e aumentar a disponibilidade e eficiência na utilização de nutrientes. Eles apresentaram ainda um alto teor de Mg.

Enquanto, o BBC apresentou maiores valores para a matéria orgânica, carbono orgânico e relação C/N. E, um alto teor de lignina, quando comparado ao BB.

De maneira geral, pode-se concluir que tanto a matéria-prima quanto os biocarvões, produzidos por pirólise lenta a 350°C , ao serem caracterizados apresentaram características propícias para o uso agrícola, mas o BP e o BB se

destacam, pois podem trazer maiores benefícios, em termos de fertilidade, quando aplicado ao solo.

REFERÊNCIAS

AGRAFIOTI, E. *et al.* Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.101, p.72-78, may/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237013000454>
Acesso em: 29 nov. 2021.

ALAMINO, R. C. J *et al.* Biodisponibilidade de Cd em Latossolo Acrescido de Lodo de Esgoto. **Anuário do Instituto de Geociências**, UFRJ, v.30, p.45-54, ago/2007. Disponível em: <https://doaj.org/article/79ee36d6b535420e89e2aca187855004>
Acesso em: 29 nov. 2021.

ALOKIKA *et al.* Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 169, p. 564-582, dec/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014181302353563>
Acesso em: 29 nov. 2021

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2862-10**: Particle size distribution of granular activated carbon. West Conshohocken: ASTM International, 2010. 6 p. Disponível em: <http://www.astm.org>. Acesso em: 06 jun. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**: Chemical analysis of wood charcoal. West Conshohocken: ASTM International, 2007. 2 p. Disponível em: <http://www.astm.org> Acesso em: 06 jun. 2020.

AMONETTE, J.E.; JOSEPH, S. Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds)., **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. London:Earthscan, 2009. P.33-52.

BARROS, I. T. *et al.* Avaliação agronômica de bio-sólido tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **Rev. Bras. Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.6, p. 630-638, mar/2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/MxYQLSBb9c6g6CSYjrKRrJG/?format=pdf&lang=pt>.
Acesso em: 29. nov. 2021

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretária de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa SDA nº17, de 21 de maio de 2007**. Brasília, 2007.

BLEULER, M. *et al.* Pyrolysis of dry toilet substrate as a means of nutrient recycling in agricultural systems: potential risks and benefits. **Waste Biomass Valorization**, v. 12, p. 4171-4183, oct/2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-020-01220-0>. Acesso em: 29 nov. 2021

CAIRES, E. F. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiências no Estado do Paraná. *In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS*, 1., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria:Fertibio, 2000.

CANTRELL, K. B. *et al.* Impacto of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology**, Oxford, v. 107, p. 419-428, 2012.

CAO, X.; HARRIS, W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinente to its potential use in remediation. **Bioresource Technology**, Oxford , v. 101, p. 5222-5228, 2010.

CHEN, X. *et al.* Biochar as tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field. **Journal of Cleaner Production**, v.290, mar/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621000317>
Acesso em: 29 nov. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: Cana-de-açúcar safra 2021/2022 1º levantamento. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 06 jun. 2020

CONZ, R. F. *et al.* Effect of pirolysis temperature and feedstock type on agricultural properties and stability of biochar. **Agricultural Sciences**, v.8, p.914-933, sept/2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1078741/1/PROCI17Effectofpyrolysisystemperature....pdf>
Acesso em: 29 nov. 2021.

DOMINGUES, R.R. *et al* Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos One**, v.12, n.5, may/2017. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0176884>. Acesso em: 29 nov. 2021.

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. *In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (Ed.). Biochar for environmental management: Science and technology.* London: Earthscan, p.13-29, 2009.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro:EMBRAPA, 1997.

ENDERS, A. *et al.* Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresour. Technol.**, v.114, p. 644-653, jun/2012.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852412004403?via%3Di>
hub. Acesso em: 29 nov. 2021

HOSSAIN, M.K. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, 92, n.1, p. 223-228, jan/2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710002938>.

Acesso em: 29 nov. 2021

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.85, n. 1-2, p. 442-446, may/2009. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237008001228>.

Acesso em: 29 nov. 2021.

JOSEPH, S. D. *et al.* Na investigation into the reactions of biochar in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 48, p. 501-515, 2010.

KAMEYAMA, K. *et al.* Effects of Biochar Produced from Sugarcane Bagasse at Different Pyrolysis Temperatures on Water Retention of a Calcaric Dark Red Soil. **Soil Science**, v.181, n.1, p.20-28, jan/2016. Disponível em:

https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2016/01000/Effects_of_Biochar_Produced_From_Sugarcane_Bagasse.3.aspx. Acesso em: 29 nov. 2021.

KIM, K. H. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). **Bioresource Technology**, Oxford, v. 118, p. 158-162, 2012.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota – a review. **Soil Biol. Biochem**, v. 43, n.9, p. 1812-1836, sep/2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071711001805>. Acesso em:

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: Introduction. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.), **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. London Earthscan, 2009. p. 1-12.

LEHMANN, J.; STEPHEN, J. M. (Eds.). **Biochar for environmental management: Science and Technology**. London: Earthscan, 2009. p. 1-448.

LI, D. C.; JIANG, H. The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: a review on characterizations and mechanism elucidation.

Bioresour. Technol., v.246, p. 57-68, dec/2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417311161>

Acesso em: 29 nov. 2021.

LORENZ, K.; LAL, R. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n.5, p.651-670, 2014.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos, 1997.

MASEK, O. *et al.* Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. **Fuel**, v.103, p. 151-155, jan/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236111005187>
Acesso em: 29 nov. 2021.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

NOBILE, F. O. Uso de resíduos na agricultura. **Rev. Uniara**, Araraquara, v.12, n.2, 2009.

NOVOTNY, E. H. *et al.* Biochar: pyrogenic biochar for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, mar./apr 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/48TVdxcrPntYWZhXyPt9MKS/?lang=en>.
Acesso em: 29 nov. 2021

PANDEY, A. *et al.* Biotechnological potential o agro-industrial residues. I: surcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, n.1, p.69-80, aug/2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085249900142X>.
Acesso em: 29 nov. 2021

PANDOLFO, A. G.; AMINI-AMOLI, M.; KILLINGLEY, J. S. Activated carbons prepared from shells of different coconut varieties. **Carbon**, v.32, p.1015–1019, 1994. Disponível em: <http://hdl.handle.net/102.100.100/239005?index=1> Acesso em: 29 nov. 2021.

PEDROZA, J. P *et al.* Doses crescentes de bio sólido e seus efeitos na produção e componentes do algodoeiro herbáceo. **Rev.de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, PB, v. 5, n. 2, 2005.

PEREIRA, T. V.; SEYE, O. **Caracterização física de biomassa local**. Dourados: UFGD, 2014.

PETTER, F.A.; MADARI, B.E. Biochar: agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n. 7, p. 761-768, jul/2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700009> Acesso em: 29 nov. 2021

PITUELLO, C. *et al.* Characterization of chemical-physical, structural and morphological properties of biochars from biowastes produced at different temperatures. **J. Soil. Sediment**, v.15, n.4, p.792-804, 2015. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-014-0964-7> Acesso em: 29 nov. 2021

PRADHAN, S. *et al.* Biochar from vegetable wastes: agro-environmental characterization. **Biochar**, v.2, p. 439-453, oct/2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-020-00069-9> Acesso em: 30 nov. 2021

RAJKOVICH, S. *et al.* Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochar with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, p. 271-284, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-011-0624-7>. Acesso em: 30 nov. 2021.

REHRAH, D. *et al.* Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, n. 108, p. 301–309, jul/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237014000679?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021.

RUTHERFORD, D. W. *et al.* Effect of formation conditions on biochar: composition and structural properties of cellulose, lignina and pine biochars. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 693-701, nov/2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953412002681> Acesso em: 30 nov. 2021

SANTOS, M. L. *et al.* Estudos das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Rev. Química Nova**, v.34, n.3, 507-511, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/sxZDXqHQFSpNds9s6gv3tnC/?lang=pt> Acesso em: 30 nov. 2021.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Viçosa: UFV, 2006.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 48, p. 516-525, sept/2010. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR10058> Acesso em: 30 nov. 2021.

SCHMITT, C. C. *et al.* From agriculture residue to upgraded product: The thermochemical conversion of sugarcane bagasse for fuel and chemical products. **Fuel Processing Technology**, v. 197, jan/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382019311567> Acesso em: 30 nov. 2021.

SOHI, S. P. Carbon storage with benefits. **Science**, v. 338, n. 6110, p. 1034-1035, nov/2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23180849/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

SOUZA, C. de S. *et al.* Induced changes of pyrolysis temperature on the physicochemical traits of sewage sludge and on the potential ecological risks. **Scientific Reports**, v.11, jan/2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-79658-4> Acesso em: 30 nov. 2021.

SOUZA, T. T.; LIMA, A. B.; TEIXEIRA, W. G. O aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo através da aplicação de carvão vegetal em um latossolo amarelo na Amazônia Central. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 61., 2009, Manaus. **Anais...** Manaus: SBPC, 2009.

TOMÉ JR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997.

TOSCAN, A. *et al.* High-pressure carbon dioxide water pre-treatment of sugarcane bagasse and elephant grass: assessment of the effect of biomass composition on process efficiency. **Bioresource Technology**, v.224, p.639-647, jan/2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852416316224> Acesso em: 30 nov. 2021.

VELMURUGAN, R.; MUTHUKUMAR, K. Sono-assisted enzymatic saccharification of sugarcane bagasse for bioethanol production. **Biochemical Engineering Journal**, v.63, p.1-9, 2012. Disponível em: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/854328> Acesso em: 30 nov. 2021.

WASTOWSKI, A. D. *et al.* Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva. **Rev. Química Nova**, v. 33, n.7, 1449-1452, 2010.

XING, J.; XU, G.; LI, G. Comparison of pyrolysis process, various fractions and potential soil applications between sewage sludge-based biochars and lignocellulose-based biochars. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.208, 2021. Disponível em: <https://doaj.org/article/81fb65dcb668496781fd124bedf7617a> Acesso em: 30 nov. 2021.

XUE, Y. *et al.* Pyrolysis of sewage sludge by electromagnetic induction: biochar properties and application in adsorption removal of Pb(II), Cd(II) from aqueous solution. **Waste Manag.**, v.89, p. 48-56, apr/2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19301795> Acesso em: 30 nov. 2021.

YUAN, H. *et al.* Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge pyrolysis. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, p.1-5, apr/2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-013-0126-9> Acesso em: 30 nov. 2021.

ZELAYA, K. P. S. *et al.* Biochar in sugar beet production and nutrition. **Ciência Rural**, v.49, n. 5, 2019. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cr/a/Vt65bdkP8yyJNfqfMfzHYmh/?format=pdf&lang=en>
Acesso em: 30 nov. 2021.

ZHANG, A. *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, v.127, p.153-160, 2012.

ZHAO, L. *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.256-257, p. 1-9, 2013.

ARTIGO II:

**CULTIVO DA *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDU E ATRIBUTOS DO SOLO
EM FUNÇÃO DO USO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ADUBAÇÃO
NITROGENADA**

II. CULTIVO DA *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDU E ATRIBUTOS DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ADUBAÇÃO NITROGENADA

RESUMO

Os condicionadores de solos são produtos que podem promover a melhoria nos atributos químicos, físicos ou biológicos do solo. O objetivo do presente estudo foi avaliar se aplicações de resíduos orgânicos e biocarvões individuais ou combinados com adubação nitrogenada interferem nos atributos do solo e no desenvolvimento da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Assim, numa primeira etapa foi instalado um experimento em delineamento inteiramente casualizados (DIC), com esquema fatorial 7x4 e 5 repetições, sendo que os tratamentos foram constituídos por 7 composições de substrato (solos + composto orgânico) sendo eles: solo controle (SC); solo + 300g de bio sólido puro (BP); solo + 100g de bagaço de cana-de-açúcar puro (BCP); solo + 150g de bio sólido puro + 50g de bagaço de cana-de-açúcar puro (BP+BCP); solo + 300g de biocarvão de bio sólido (BB); solo + 100g de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar (BBC); solo + 150g de biocarvão de bio sólido + 50g de biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar (BB+BBC); e 4 doses de adubação nitrogenada mineral: 0; 12,5; 25 e 50 mg dm⁻³. Ao todo foram realizados 4 cortes nas plantas aos 60, 88, 116 e 144 dias após o plantio. Numa segunda etapa foi avaliado o desenvolvimento do capim Marandu por meio das variáveis fisiológicas: produção de massa foliar, produção de massa radicular, teor de nitrogênio total e carbono orgânico nos tecidos vegetais. Quanto ao solo, foram avaliadas os atributos químicos e biológicos, após o cultivo do capim Marandu. Para isso foram realizadas análises de caráter químico (determinação dos teores de pH, teor de matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, N-total, N-inorgânico e Carbono Orgânico Total) e, biológico (respiração basal do solo, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, atividade da enzima desidrogenase e hidrólise de diacetato de fluoresceína). Os dados obtidos nos experimentos foram submetidos à análise de variância pelo software SISVAR. Para comparação de médias, foi utilizado o teste Scott Knott a 5% de probabilidade. Já para correlação de Person foi utilizado o teste t a 5% de probabilidade e, foi realizada ainda uma análise multivariada de componentes principais das variáveis químicas do solo pelo software R. A aplicação dos materiais no solo apresentou efeitos positivos onde o solo com inserção de BP na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ evidenciou maiores valores em relação a produtividade da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. E, solos com adição de BP e BB, individual ou combinado com ADN, proporcionou aumento no pH, CTC e saturação por bases. Sendo que a adição de resíduos orgânicos e biocarvões também evidenciou variações para os atributos biológicos do solo, onde o solo com BP+BCP na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ apresentou maior valor para as atividades enzimáticas da desidrogenase e FDA. E, o maior teor de matéria orgânica e carbono orgânico foi obtido no solo com inserção de BCP, individuais ou combinado com ADN. De modo geral, conclui-se que a aplicabilidade de resíduos no solo é uma prática viável, pois além de proporcionar uma sustentabilidade, por estar dando um destino mais viável e vantajoso para gestão de resíduos, sua aplicação no solo apresentou

efeitos positivos em relação a produtividade da *brizantha* cv. Marandu e aos atributos do solo.

Palavras-chave: Biossólido. Bagaço de Cana-de-açúcar. Biocarvão. Fertilidade do Solo. Biologia do Solo.

1. INTRODUÇÃO

A degradação do solo implica na diminuição da capacidade produtiva e, no caso dos solos agrícolas ocorre, principalmente, em função do manejo inadequado desse recurso. Segundo estudo coordenado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2015) cerca de 30% dos solos mundiais estão degradados.

A utilização de resíduos orgânicos como condicionadores de solos agrícolas é uma alternativa utilizada em vários países como Estados Unidos, Holanda e Austrália (PIRES; MATTIAZZO, 2008). Os condicionadores de solos são produtos que podem promover a melhoria nos atributos químicos, físicos ou biológicos do solo (ALMEIDA, 2008).

Alguns resíduos urbanos e agroindustriais são utilizados como condicionadores de solos, pois é uma forma de tentar aumentar ao máximo a reciclagem desses resíduos, minimizando o descarte inadequado e dando um destino sustentável.

Nesse contexto têm-se o bagaço de cana-de-açúcar, resíduo agroindustrial gerado em grandes quantidades. A aplicação desse resíduo pode melhorar a porosidade e aeração do solo (SOMMAGGIO *et al.*, 2018).

Já o biossólido é um resíduo urbano produzido em grandes quantidades, gerado no processo final do tratamento das águas residuárias nas ETE's. No Brasil a produção de biossólido atinge cerca de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano (MANCA *et al.* 2020).

Segundo Lobo *et al.* (2013) o biossólido é um material rico em nutrientes, como o nitrogênio e carbono orgânico. Possui ainda em sua composição fósforo e alguns elementos como ferro, cobre, manganês e zinco, de modo que, a inserção do biossólido no solo configura uma prática de desenvolvimento de sistema agrícola

sustentável. Porém há restrições para sua aplicação no solo (Resolução CONAMA nº 375 de 2006).

A transformação de resíduos como o biossólido e o bagaço de cana-de-açúcar em biocarvão através do processo térmico, pirólise, é uma boa opção no manejo dos mesmos diminuindo, desta forma, o potencial de impacto ambiental (INGUANZO *et al.*, 2002; HOSSAIN *et al.*, 2009).

O biocarvão é um subproduto rico em carbono produzido através de um processo térmico, onde a biomassa é degradada na ausência parcial ou total de oxigênio (LEHMANN *et al.*, 2011; OK *et al.*, 2015).

A aplicação de biocarvão pode modificar solos ácidos e reduzir a perda de nitrogênio (CLOUGH; CONDRON, 2010; LAN *et al.*, 2017; HOU *et al.*, 2021). Podendo ainda melhorar os atributos de solos degradados e de baixa fertilidade, aumentando a produtividade das culturas (EL-NAGGAR *et al.*, 2019).

O biocarvão no solo pode aumentar o pH, a capacidade de troca catiônica e carbono orgânico, propiciar refúgio para microbiota, aumentar a disponibilidade de nutrientes pela alteração da biota do solo e, melhorar a estrutura do solo (TRAZZI *et al.*, 2018).

Neste sentido o presente estudo teve como objetivo avaliar se aplicações de resíduos orgânicos e biocarvões, individuais ou combinados com adubação nitrogenada, interferem nos atributos do solo e no desenvolvimento da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de desenvolvimento do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação aberta (Figura 1), localizada a 22°06'57.7 de latitude sul e 51°27'03.6 de longitude oeste, no período de dezembro de 2019 a setembro de 2020 no Campus II da Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, situado no município de Presidente Prudente, estado de São Paulo.

Segundo a classificação de Köppen o clima da região é CWA com verão úmido e inverno seco, com duas estações definidas, um período de verão-outono,

mais quente (temperaturas médias das máximas entre os 27 °C e 29°C) e muito chuvoso (entre 150 e 200 mm mensais) e, invernos amenos (com temperaturas médias das mínimas entre os 16°C e 18°C) e menos úmidos (chuvas mensais entre os 20 e 50 mm).

Figura 1 – Local de condução do experimento

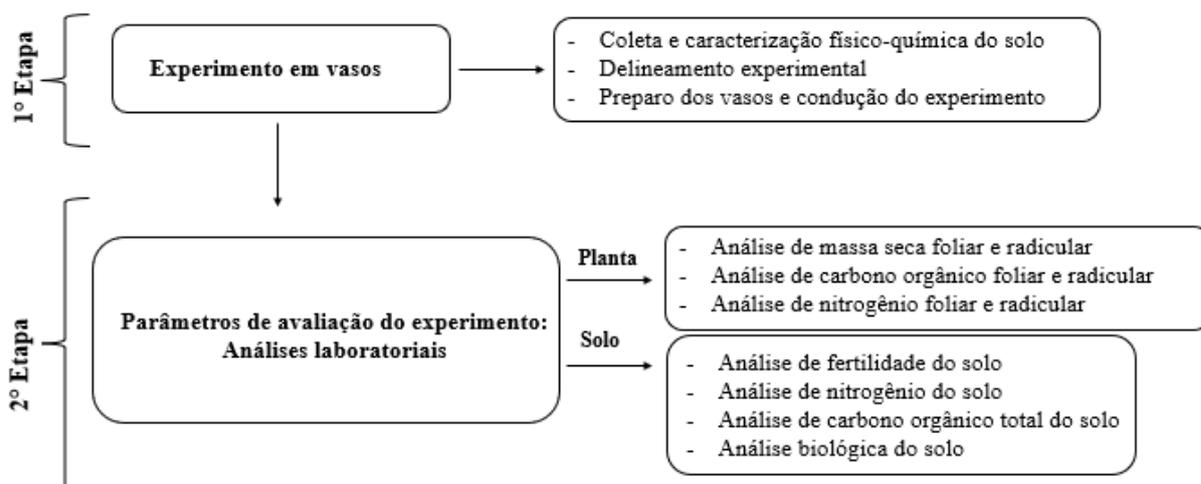


Fonte: A autora.

2.2. Etapas de desenvolvimento do projeto

O presente capítulo foi dividido em duas etapas de trabalho: experimento em vasos e análises laboratoriais de parâmetros do solo. Para melhor entendimento, a Figura 2 apresenta a cronologia das etapas realizadas neste trabalho.

Figura 2 – Fluxograma concernente as etapas de desenvolvimento do projeto



Fonte: A autora.

2.2.1. Etapa 1 – Experimento em vasos

2.2.1.1. Coleta e caracterização físico-química do solo

O solo utilizado no experimento foi do tipo terra de barranco, coletado na camada de 0-20 cm de profundidade. Após a coleta foram retirados dez sub amostras para composição de uma única amostra que foi encaminhada para o laboratório de Análise Físico-Química de Solos da Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE.

Posteriormente, as amostras de solos foram submetidas à análise granulométrica pelo método da pipeta para determinação dos teores de areia total, silte e argila (EMBRAPA, 1997) e, análise química para determinação dos teores de pH, teor de matéria orgânica, carbono orgânico total, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, segundo metodologia descrita por Raji *et al.* (2001). A partir desses dados foram obtidos os valores da soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). Foram realizadas também análise de micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês e zinco), segundo Raji *et al.* (2001).

Mediante o resultado da análise física (Tabela 1) realizada antes da implantação do experimento, o solo obteve valores de 80,95% de areia, 5,2% de silte

e 13,85% de argila, enquadrando-se na classe textural, em função do triângulo textural, franco-arenosa.

Tabela 1 – Análise física do solo antecedente a instalação do experimento

Areia Total	Silte	Argila	Classe Textural
-----(g Kg^{-1})-----			
809,5	52	138,5	Franco-arenosa

Fonte: A autora.

Já em relação aos parâmetros químicos do solo, observou-se que o pH do solo apresentou um valor de 5,6 (CaCl_2). Para maioria das plantas desenvolver-se bem o pH do solo deve estar numa faixa entre 6 a 7,0. O solo analisado ainda é classificado como de baixa fertilidade natural, pois o V% encontra-se abaixo de 50% (Tabela 2).

Tabela 2 – Análise química do solo antecedente a instalação do experimento

pH	MO	COT	P	S-SO₄²⁻	Al³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	m	V	
(CaCl_2)	---(g dm^{-3})---		---(mg dm^{-3})---		-----(mmolc dm^{-3})-----								----(%)----	
5,6	12,3	7,2	20,3	0,1	0,0	19,6	2,1	10,3	6,1	18,5	38,1	0	48,6	

Boro	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco
-----(mg dm^{-3})-----				
0,17	3,10	35,60	16,30	1,70

Fonte: A autora.

Legenda: pH: potencial hidrogeniônico; MO: Matéria orgânica; COT: Carbono orgânico total; P: Fósforo; Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S-SO₄²⁻: Teor de sulfato; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; m: Saturação por alumínio; V: Saturação por bases.

Após a análise da caracterização do solo foi definido o delineamento experimental do projeto e realizado os cálculos da quantidade de materiais utilizados nos tratamentos. Foi feito um cálculo com base no volume de solo do vaso (10 dm^3), onde o nível do bio sólido e seu respectivo biocarvão correspondeu a 3%. O bagaço de cana-de-açúcar e o biocarvão de bagaço a 1%. E as misturas dos resíduos e biocarvões a 2% do volume do solo do vaso. Para o cálculo da adubação nitrogenada

aplicada nos vasos foi tomado como base a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura da *brachiaria* (RAIJ *et al.*, 1997).

2.2.1.2 Delineamento experimental

Foi utilizado delineamento inteiramente casualizados (DIC), em esquema fatorial 7x4 com 5 repetições, sendo que os tratamentos foram constituídos por 7 composições de substrato sendo eles: solo controle (SC); solo + 300 g de bio sólido puro (BP); solo + 100 g de bagaço de cana-de-açúcar puro (BCP); solo + 150 g de bio sólido puro + 50 g de bagaço de cana-de-açúcar puro (BP+BCP); solo + 300 g de biocarvão de bio sólido (BB); solo + 100 g de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar (BBC); solo + 150 g de biocarvão de bio sólido + 50 g de biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar (BB+BBC); e 4 doses de adubação nitrogenada mineral (ADN): 0; 12,5; 25 e 50 mg dm⁻³ correspondente a 0, 25, 50 e 100 kg de N ha⁻¹, por ciclo simulado de pastejo (Tabela 3).

Tabela 3 – Delineamento experimental do projeto

(continua)

Tratamentos	ADN (mg dm ⁻³)	N (kg ha ⁻¹)
SC	0,0	0
SC 25	12,5	25
SC 50	25,0	50
SC 100	50,0	100
BP	0,0	0
BP 25	12,5	25
BP 50	25,0	50
BP 100	50,0	100
BCP	0,0	0
BCP 25	12,5	25
BCP 50	25,0	50
BCP 100	50,0	100
BP+BCP	0,0	0
BP+BCP 25	12,5	25
BP+BCP 50	25,0	50
BP+BCP 100	50,0	100
BB	0,0	0
BB 25	12,5	25
BB 50	25,0	50
BB 100	50,0	100

Tabela 3 – Delineamento experimental do projeto

(conclusão)

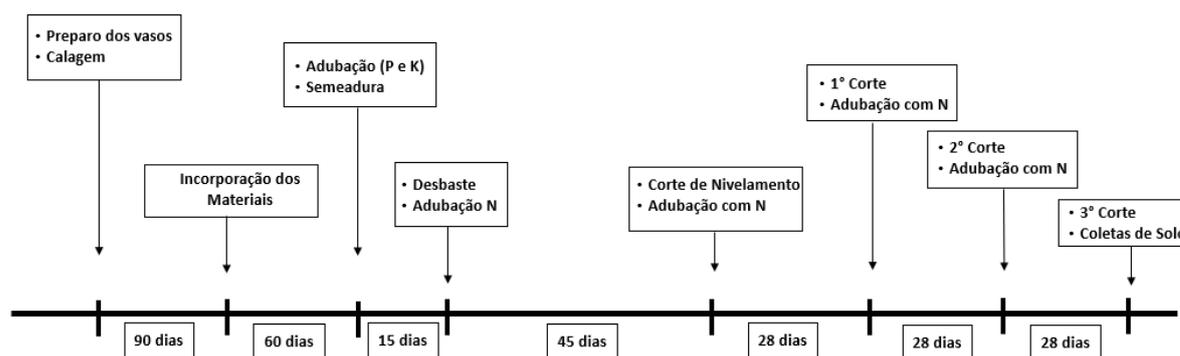
Tratamentos	ADN (mg dm ⁻³)	N (kg ha ⁻¹)
BBC	0,0	0
BBC 25	12,5	25
BBC 50	25,0	50
BBC 100	50,0	100
BB+BBC	0,0	0
BB+BBC 25	12,5	25
BB+BBC 50	25,0	50
BB+BBC 100	50,0	100

Fonte: A autora.

2.2.1.3 Preparo dos vasos e condução do experimento

Foram utilizados vasos de PVC com dimensões de 28 cm de diâmetro x 28 cm de altura, com capacidade para 15 L. Estes vasos foram preenchidos com 10 dm³ de solo e, posteriormente seguiu-se a cronologia de trabalho descrita na Figura 3.

Figura 3 – Cronologia de trabalho para a condução do experimento



Fonte: A autora

Após os vasos serem preenchidos e, mediante o resultado da análise química de solo (Tabela 2), foi realizado a aplicação e incorporação de 1 g de calcário dolomítico com objetivo de elevar a saturação por bases para 70%. Após a calagem

os vasos foram umedecidos e cobertos com sacos pretos, onde permaneceram incubados por 90 dias (Figura 4).

Figura 4 – Período de incubação



Fonte: A autora

Passados os 90 dias foi realizado a incorporação dos materiais (Figura 5), de acordo com o delineamento relatado anteriormente e, repetido o processo de incubação por mais 60 dias para então proceder a semeadura da *Urochloa brizantha* cv. Marandu numa densidade de 15 sementes por vaso. Aproximadamente 15 dias após a germinação das plantas foi realizado um desbaste deixando apenas as cinco plantas mais vigorosas e bem distribuídas por vaso.

No momento do plantio ainda foi realizada uma adubação com fósforo de 180 mg dm^{-3} , potássio de 150 mg dm^{-3} , boro de $1,4 \text{ mg dm}^{-3}$ e zinco de $1,7 \text{ mg dm}^{-3}$, as fontes utilizadas foram, respectivamente, superfosfato simples (2.290 mg dm^{-3}), cloreto de potássio (302 mg dm^{-3}), ácido bórico (8 mg dm^{-3}) e sulfato de zinco ($8,5 \text{ mg dm}^{-3}$) que foram diluídos em 1.000 mL de água e aplicado nos vasos.

A adubação nitrogenada nas doses testadas (0 ; $12,5$; 25 e 50 mg dm^{-3} de N), foram aplicadas utilizando-se como fonte a ureia (0 ; $27,75$; $55,5$ e 111 mg dm^{-3} de uréia), diluídos em 1.000 mL de água e aplicado nos vasos após o desbaste. Todas as aplicações foram realizadas em dosagem única, com exceção da dose de 111 mg dm^{-3} que foi subdividida em duas aplicações, onde 50% foram aplicados junto com as demais e, os outros 50% aplicados 15 dias após a aplicação anterior. Isso foi realizado para evitar o efeito de toxicidade nas plantas pelo excesso de N.

Figura 5 – Incorporação dos materiais ao solo



Fonte: A autora

Legenda: (a) Inserção de biossólido no solo; (b) Homogeneização do biossólido no solo; (c) Inserção do bagaço de cana-de-açúcar no solo; (d) Homogeneização do bagaço de cana-de-açúcar no solo; (e) Inserção do biocarvão de biossólido no solo; (f) Homogeneização do biocarvão de biossólido no solo; (g) Inserção do biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar no solo; (h) Homogeneização do biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar no solo.

A germinação ocorreu 10 dias após a semeadura da *Urochloa brizantha* cv. Marandu (Figura 6).

Figura 6 – Germinação da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

Fonte: A autora

Quanto ao corte das plantas, foi realizado um primeiro corte de uniformização (Figura 8) 45 dias após o desbaste (Figura 7). Posteriormente foram realizados mais três cortes (ciclo de pastagem simulado) com intervalo de 28 dias entre cada um, ou seja, 1º corte com 28 dias, o 2º corte com 56 e o 3º corte com 84 dias após o corte de uniformização, todos à altura de 5 cm da superfície do solo. Após o corte de nivelamento e o 1º e 2º corte foram repetidas as adubações nitrogenadas (ADN) nas dosagens já estipuladas, obedecendo o mesmo critério de aplicação descrito anteriormente.

Figura 7 – *Urochloa brizantha* cv. Marandu após o desbaste



Fonte: A autora

Figura 8 – *Urochloa brizantha* cv. Marandu após o corte de uniformização



Fonte: A autora

No decorrer do experimento, após o corte de uniformização, observou-se o surgimento de pragas atacando a parte foliar da planta, devido a isso foi necessário a aplicação do inseticida do grupo piretroid, Decis, onde em 5 L de água foi utilizado 25 mL do produto. Foram necessárias 3 aplicações, devido ao surgimento da lagarta (Figura 9) e do pulgão (Figura 10).

Figura 9 – Ataque da lagarta na folha da *Urochloa brizantha* cv. Marandu



Fonte: A autora

Figura 10 – Ataque de pulgão na folha da *Urochloa brizantha* cv. Marandu



Fonte: A autora

Para garantir ótimas condições de crescimento (Figura 11), as plantas foram irrigadas três vezes por semana, com 600 mL de água por vez, totalizando 1.800 mL de água por semana (cálculo com base na capacidade de campo de 60%).

Figura 11 – Desenvolvimento da *brachiaria* antes do 3º corte



Fonte: A autora

No final do experimento foram realizadas coletas foliares (Figura 12) e radiculares para realização das análises de massa seca, nitrogênio e carbono orgânico total.

Figura 12 – Coleta da parte foliar da *Urochloa brizantha* cv. Marandu



Fonte: A autora

E, coletas de solo (Figura 13) nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm para realização da análise de nitrogênio total e nitrogênio inorgânico (NH_4^+ e N-NO_3^-). Também foram feitas coletas nas profundidades de 0-10 cm para análise de fertilidade e biologia do solo. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análise de Tecidos Vegetais, Laboratório de Análise Físico-Química de Solos e, Laboratório de Biologia do Solo da UNOESTE.

Figura 13 – Coleta de solo



Fonte: A autora

2.2.2. Etapa 2 – Parâmetros de avaliação do experimento

Para proceder à avaliação do experimento foram analisados os seguintes parâmetros: atributos de fertilidade do solo, atributos biológicos do solo e atributos fisiológicos da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

2.2.2.1. Atributos de fertilidade do solo

A análise de fertilidade do solo (determinação dos teores de pH, matéria orgânica, fósforo, enxofre, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, hidrogênio mais alumínio, boro, cobre, ferro, manganês e zinco) foi realizada segundo a metodologia descrita por Raji *et al.* (2001) pelo Laboratório de Análises Físico-Química da UNOESTE. Antes de iniciar as análises químicas, o solo foi destorroado e peneirado (Figura 14).

Figura 14 – Destorroamento do solo



Fonte: A autora

- Análise de nitrogênio total e inorgânico (NH_4^+ e NO_3^-) do solo

As amostras de solo foram coletadas numa profundidade de 0-5 e 5-10 cm para a determinação do N-total (Figura 15) e do N-inorgânico (Figura 16) nas frações de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), sendo que após serem coletadas foram acondicionadas em saquinhos plásticos e enviadas para o laboratório onde foram armazenadas em recipiente hermeticamente fechado contendo N líquido para a preservação das condições naturais. As análises de nitrogênio foram realizadas de acordo com a metodologia de Cantarella e Trivelin (2001).

Figura 15 – Digestão e destilação do teor de nitrogênio total nas amostras de solo



Fonte: A autora

Figura 16 – Análise de nitrogênio inorgânico (NH_4^+ e NO_3^-)



Fonte: A autora

Cálculo para quantificação do N-total, NH_4^+ e NO_3^- , em mg kg^{-1} :

$$N = [(V_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ amostra}} - V_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ branco}}) * F_{\text{ácido}} * V_{\text{total}} * 1000] / [V_{\text{extrato de destilado}} * M]$$

$F_{\text{ácido}}$ = fator do ácido sulfúrico, 0,0967; V_{total} = volume total do extrato de digestão (mL); 1000 = fator de conversão g em kg; $V_{\text{extrato de destilado}}$ = volume de extrato destilado e M = massa seca de solo (g).

- Análise de carbono orgânico total (COT) do solo

As amostras de solo foram coletadas numa profundidade de 0-5 e 5-10 cm para a determinação do COT do solo (Figura 17). Onde o teor de matéria orgânica foi obtido pelo método descrito por Raji *et al.* (2001, *apud* WALKLEY; BLACK, 1934). E, aplicado o fator de Van Bemmelen – 1,724 baseado que a matéria orgânica do solo tem 58% de carbono orgânico, para conversão da matéria orgânica em COT.

O cálculo para quantificar o teor de carbono orgânico total do solo em g dm^{-3} é:

$$\text{COT} = [\text{Matéria Orgânica}/1,724]$$

Figura 17 – Leitura do teor de matéria orgânica do solo



Fonte: A autora

2.2.2.2. Atributos biológicos do solo

Para a realização das análises biológicas, primeiramente, o solo foi seco em bancada, ao ar livre, por 24 horas. Após este processo as amostras de solo passaram por uma peneira de 2,0 mm de malha, para então proceder com as análises.

▪ Respiração basal do solo

A respiração do solo foi avaliada segundo Alef e Nanipieri (1995). Foram pesadas 50 g de solo de cada amostra. Estas foram homogeneizadas e mantidas dentro de frascos herméticos. Sobre a superfície do solo, em cada frasco foi colocado um becker de 50 mL, contendo 40 mL de solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹. Os frascos foram incubados pelo período de 96 horas. Para avaliar a retenção de CO₂ na solução, foi utilizado o método condutimétrico (RODELLA; SABOYA, 1999) com leitura de condutividade na solução de NaOH após 96 horas (Figura 18), empregando-se um condutivímetro de bancada Quimis Q795A2. A quantidade de CO₂ produzida pela respiração foi calculada utilizando a seguinte fórmula, definida por Rodella e Saboya (1999) e, os resultados foram expressos em mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹.

$$RBS = [22 * (\text{Condutividade}_{\text{branco}} - \text{Condutividade}_{\text{amostra}}) / (\text{Condutividade}_{\text{branco}} - 2,00)]$$

Figura 18 – Análise de respiração do solo



Fonte: A autora

- Biomassa microbiana do solo (BMS)

A análise de biomassa microbiana do solo foi realizada em duplicata, utilizando a metodologia descrita por Ferreira, Camargo e Vidor (1999). Foram pesadas em erlenmeyer de 250 mL, 2 amostras de 50 g de cada tratamento, onde as mesmas foram umedecidas com 3 mL de água destilada para atingir aproximadamente 25% da capacidade de campo de um solo arenoso (REICHARDT, 1988), agitadas para uniformizar a distribuição da umidade e colocada uma amostra de cada tratamento para irradiar no microondas por um tempo que foi determinado pela seguinte fórmula:

$$T = r.m_t / P$$

T refere-se ao tempo real de exposição das amostras ao microondas; R a 800J g⁻¹ de solo, quantidade de energia necessária para exposição; m_t é a massa total das amostras a serem irradiadas em gramas; e P a potência real do aparelho em W.

A potência real do aparelho foi calculada pela seguinte fórmula:

$$P = (C_p \cdot K \cdot \Delta t \cdot m) / T$$

P refere-se à potência real do aparelho em W; C_p a 1 J ml⁻¹ °K⁻¹, capacidade da água de receber calor; K a 4,184, fator de correção de cal m⁻¹ ° K⁻¹ para watts (J s⁻¹); Δt a Variação de temperatura em °C de 1 L de água em 2 minutos de exposição; m a 1000 g, massa da água em gramas; e t a 120 s, tempo de exposição da água ao microondas.

As amostras irradiadas e não irradiadas foram submetidas à extração com 50 mL de sulfato de potássio - K_2SO_4 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) por 30 minutos, em mesa agitadora orbital. Deixados decantar e filtrados em papel filtro (Figura 19).

Figura 19 – Processo de extração e filtração do solo



Fonte: A autora

A determinação do carbono nos extratos irradiados e não irradiados foram realizadas utilizando 10 mL do extrato, oriundo dos 50 mL após filtração e, adicionando em seguida 2 mL de $K_2Cr_2O_7$ ($0,066 \text{ mol L}^{-1}$), 10 mL de H_2SO_4 concentrado e 5 mL de H_3PO_4 concentrado. A titulação ocorreu com a utilização do sulfato ferroso amoniacal ($0,04 \text{ mol L}^{-1}$) com fenil-alanina como indicador (Figura 20).

Figura 20 – Análise de carbono da biomassa microbiana do solo



Fonte: A autora

O C extraído do solo foi calculado pela fórmula:

$$C \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} = ((V_b - V_a) * N * 1000 * V_{\text{extrator}}) / (\text{volume do extrato} * \text{MSS})$$

C refere-se ao carbono extraído do solo; V_b é o volume (mL) do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ gasto na titulação do branco; V_a é o volume (mL) do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ gasto na titulação da amostra; N é a normalidade exata do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$, $N = 0,677$; V_{extrator} é o volume de K_2SO_4 utilizado na extração = 50 mL; V_{extrato} é o volume de K_2SO_4 utilizado para análise = 10 mL; e MSS é a Massa do solo seco em gramas = 50 g.

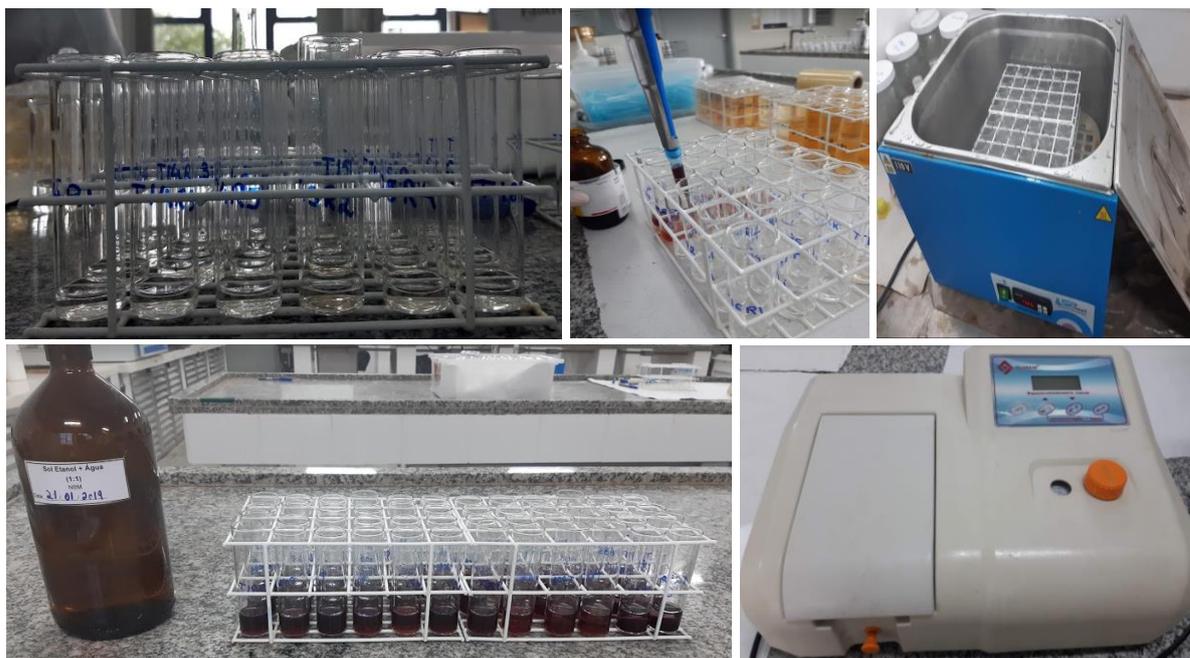
O C_{mic} é calculado pela fórmula:

$$C_{mic} \text{ (mg Kg}^{-1}\text{)} = (C_I - C_{NI}) / K_{ec}$$

C_I refere-se ao carbono extraído do solo irradiado; C_{NI} ao carbono extraído do solo não irradiado; K_{ec} ao proporção total do carbono microbiano extraído após irradiação = 0,21 (FRIGHETTO, 2000). O fator de correção K_{ec} citados na literatura são muito variáveis (0,21 a 0,45), não havendo um consenso a respeito do valor que foi utilizado. Neste trabalho foi adotado o valor de 0,21 (FRIGHETTO, 2000).

Já o nitrogênio da biomassa microbiana (N_{mic}) foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995). Para proceder esta análise foi utilizado o mesmo extrato do C_{mic} , a partir de 0,6 mL do extrato adicionado a um tubo de ensaio. Junto ao extrato foi adicionado 1,4 mL de ácido cítrico ($0,2 \text{ mol L}^{-1}$), pH 5,0 e 1 mL do reagente ninidrina. Os tubos foram incubados a 100°C , em banho-maria, por 25 minutos. Após esfriarem, foi adicionado 4 mL da mistura etanol:água (1:1), para posterior leitura no espectrofotômetro a 570nm (Figura 21).

Figura 21 – Análise de nitrogênio da biomassa microbiana do solo



Fonte: A autora

O Nmic é calculado pela seguinte fórmula:

$$N_{mic} \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} = [(N_i * 1,2/0,0182) - (N_{Ni} * 1,2/0,0182)]$$

N_i refere-se ao nitrogênio extraído do solo irradiado; N_{Ni} ao nitrogênio extraído do solo não irradiado.

- Quociente metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico é a razão entre o C-CO₂ liberado pela respiração do solo pelo C na biomassa microbiana, expresso em mg C-CO₂ kg⁻¹ BMS-C h⁻¹ (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

- Quociente microbiano ($qMic$)

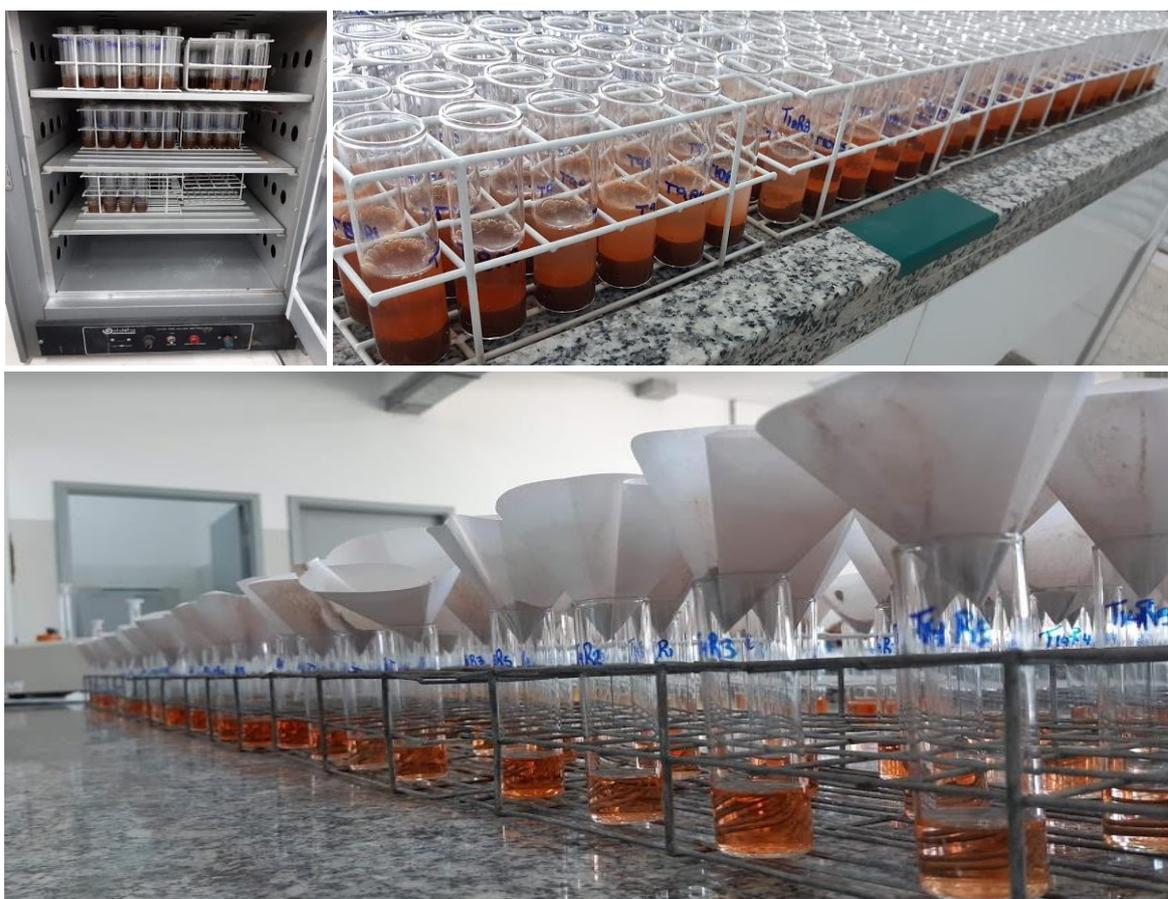
O quociente microbiano é um índice utilizado para fornecer indicações sobre a qualidade da matéria orgânica, sendo expresso pela relação entre o Cmic e o COT do solo (REIS JUNIOR; MENDES, 2007). O mesmo foi obtido pela seguinte fórmula:

$$qMic \text{ (\%)} = [((Cmic/1000) / COT)] * 100$$

- Análise da atividade da enzima desidrogenase

A análise da atividade da enzima desidrogenase foi realizada em duplicata e, estimada segundo a metodologia de Van Os e Ginkel (2001). Foram pesadas 5 g de solo de cada amostra em tubos de ensaio. Posteriormente, adicionou-se 1 mL de glicose a 0,1% e, 2 mL de T.T.C a 1% nas amostras, exceto no branco. Na amostra branco foram adicionadas 1 mL de glicose a 0,1% e 2 mL de solução tampão tris – THAM a 0,1 M (pH= 7,6). Em seguida as amostras foram incubadas a 37 °C, por 18 h. Após a incubação, foi adicionado 9 mL de metanol em todas as amostras e, logo em seguida, filtradas (Figura 22) para a realização da leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 530 nm.

Figura 22 – Análise da atividade da enzima desidrogenase do solo



Fonte: A autora

Para a obtenção dos valores da desidrogenase, primeiramente foi necessário calcular a transmitância pela seguinte fórmula:

$T(\%) = [1 - Ab] * 100$, onde Ab é a absorvância obtida da leitura no espectrofotômetro. Posteriormente aplicou-se o cálculo para obtenção dos valores da atividade da enzima desidrogenase:

$$\mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo}^{-1} \text{ h}^{-1} = [104 - (T*104)/100] / 7$$

▪ Método de hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)

A atividade hidrolítica do FDA foi estimada segundo Swisher e Carroll (1980). Foram pesados 5 g de solo das amostras em erlenmeyer de 125 mL, posteriormente adicionou-se 20 mL de tampão fosfato de sódio a 0,06 M (pH 7,6) e, 0,2 mL de solução de diacetato de fluoresceína (2 mg mL^{-1} acetona). Em seguida as amostras foram levadas a mesa agitadora orbital por 20 minutos. Após a agitação, foi adicionado 20 mL de acetona. Posteriormente iniciou-se o processo de filtração (Figura 23) e, leitura das amostras em espectrofotômetro no comprimento de onda de 490 nm.

Figura 23 – Análise de FDA



Fonte: A autora

O FDA é calculado pela seguinte fórmula:

$$\mu\text{g FDA hidrolisado g}^{-1} \text{ solo h}^{-1} = [Ab - 0,0944] / 0,0058,$$

Onde, Ab é a absorvância obtida da leitura no espectrofotômetro.

2.2.2.3. Atributos fisiológicos da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

- Análise da massa seca e análise foliar

Ao final de cada ciclo de pastagem simulada foi realizado o corte da parte aérea das plantas e determinado a massa verde do material contido em cada vaso, com auxílio de uma balança eletrônica de precisão.

Posteriormente as amostras foram lavadas e secaram ao livre por 24h e, acondicionadas em sacos de papel para serem enviadas a estufa de circulação forçada de ar, a 65°C (Figura 24), até atingirem massa constante e, pesadas para determinação da massa seca. Em seguida, o material foi moído em moinho tipo Willey, para posterior determinação dos teores de nitrogênio total e carbono orgânico total foliar (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Figura 24 – Secagem das amostras para determinação da massa seca



Fonte: A autora

- Análise da massa seca e análise radicular

Após o 3º corte, foi removido a massa de solo de cada vaso, contendo as raízes, as quais foram colocadas dentro de uma peneira (malha 2 mm) e foram, cuidadosamente, lavadas em água corrente com auxílio de pequena ducha acoplada a uma mangueira. Em seguida, as raízes dos respectivos vasos e tratamentos foram acondicionadas em sacos de papel e pesadas com auxílio de uma balança eletrônica de precisão, para obtenção da massa verde.

Já a massa seca foi obtida após lavagem e secagem, ao ar livre por 24h, do material. Posteriormente foram enviados a estufa de circulação forçada, durante 72

horas, a 65°C. Concluído o procedimento de secagem, foram pesadas para determinação da massa seca. Após isso foram moídas em moinho tipo Willey, para a determinação dos teores de nitrogênio total (Figura 25) e carbono orgânico total radicular (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Figura 25 – Parte da análise de nitrogênio total radicular



Fonte: A autora

2.2.2.4. Análise estatística

Os dados obtidos nos experimentos foram submetidos à análise de variância pelo software SISVAR. Para comparação de médias foi utilizado o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Na análise de correlação de Pearson (software R) e regressão linear foi utilizado o teste t a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Foi realizada ainda uma análise multivariada de componentes principais das variáveis químicas do solo pelo software R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Parâmetros de avaliação do solo

3.1.1. Atributos químicos de fertilidade do solo

A avaliação da qualidade do solo tem se tornado muito importante. O solo é considerado como componente fundamental na manutenção e na sustentabilidade de

sistemas de produção agrícola. A qualidade química do solo está relacionada ao armazenamento e disponibilidade de nutrientes e, a produtividade do solo (DORAN; PARKIN, 1994).

A Tabela 4 apresenta os resultados dos atributos químicos de fertilidade do solos com adição de resíduos orgânicos e biocarvões após o plantio da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Sabe-se que o pH do solo influencia na disponibilidade de nutrientes às plantas (HATTEN; LILES, 2019). Pois, a maioria dos elementos minerais essenciais as plantas estão disponíveis numa faixa de pH de 6,5 a 7,5 (SINGH *et al.*, 2016; ELKHLIFI *et al.*, 2021). Para esse parâmetro observou-se, de modo geral, que os tratamentos que receberam inserção de BP e BB, exclusivos ou combinados com doses de adubação nitrogenada, obtiveram maiores valores.

O BP50, solo com adição de biossólido com dose correspondente a 50 kg de N ha⁻¹ obteve maior resultado (7,82), mas não apresentou significância em relação ao BP25, BB50, BB100, BP100, BB25, BP, BB+BBC50, BB+BBC100 e BB+BBC25. Evidenciando uma diferença significativa em relação aos demais tratamentos. Sendo que o menor valor foi obtido no BCP100, SC50, BCP50, BCP25, SC100, SC25 e BBC100.

Quando faz-se uma comparação entre o solo que foi inserido os resíduos orgânicos e os biocarvões, nota-se uma tendência dos tratamentos que receberam biossólido e seu respectivo biocarvão, exclusivos ou combinados com ADN, em aumentar o teor de pH no solo. Normalmente são observados efeitos alcalinizantes do biocarvão, isso ocorre devido ao fornecimento de cátions de caráter básico para solução do solo (ZHANG *et al.*, 2012; SMIDER; SINGH, 2014). Hazrati *et al.* (2021) trabalhando com aplicação de lodo de esgoto e seu biocarvão encontraram valores de 7,22 e 7,75. Valores estes, próximos dos obtidos no presente estudo.

Analisando, de maneira geral, pode-se dizer que o solo controle estava com pH levemente ácido, em consequência da calagem realizada no início do experimento. Pois antes da correção com o calcário, o mesmo encontrava-se com pH de 5,6 (Tabela 2).

De modo que a aplicação de bagaço de cana-de-açúcar puro e pirolisado a 350°C no solo, individuais ou combinados com ADN, para este parâmetro não evidenciou muita diferença, pois os mesmos se equiparam aos tratamentos controles puros e com doses de nitrogênio. Desta forma, supõe-se que a correção com a

calagem pode ter influenciado mais no aumento do pH, do que a adição de BCP e BBC. Observando por este lado, pode-se dizer que só a adição do BP ou BB, individuais ou combinados com ADN, poderia proporcionar o efeito da calagem no solo.

Para matéria orgânica do solo (MOS), o maior valor foi de 24,36 g dm⁻³ encontrado no BCP25, porém não houve significância em relação aos BCP100, BCP50 e BCP. O mesmo ocorreu para os valores de carbono orgânico total. Sabe-se que o bagaço de cana-de-açúcar é uma biomassa rica em carbono (INYANG *et al.*, 2010). E, no presente estudo, quando realizou a análise do teor de elementos presentes nos resíduos e biocarvões, encontrou-se 51,4% de COT presente no bagaço.

De acordo com Tomé Jr (1997) os valores de MOS são classificados como médios, pois se encontram dentro da faixa de 15 a 25 g dm⁻³. E, apesar dos tratamentos, onde foram inseridos o biossólido e a mistura dos resíduos, exclusivos ou combinados com doses de fertilizante nitrogenado, terem apresentado menores valores do que os solos com inserção de bagaço, eles se enquadram dentro da faixa mencionada. Já quando se analisa os valores desses parâmetros em solo com inserção de biocarvões, nota-se um maior teor de matéria orgânica e carbono no BB e menor no BBC havendo significância entre eles.

Observa-se ainda que onde houve aplicação de biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar teve uma redução no teor de matéria orgânica e carbono orgânico em comparação ao solo que recebeu bagaço. Supõe-se aqui que o carbono pode estar em formas mais lábeis e, devido a isso pode ser facilmente mineralizado pelos microrganismos no solo com adição de BBC. Pois, alguns estudos demonstram que o biocarvão estimula a atividade microbiana, podendo ser, principalmente, em função da porosidade do material (KOLB *et al.*, 2009; THIES *et al.*, 2009; GROSSMAN *et al.*, 2010; ZIMMERMAN *et al.*, 2011).

Apesar dos resíduos orgânicos apresentarem maiores valores para matéria orgânica e carbono, em comparação aos biocarvões, Petter e Madari (2012) mencionam que o biocarvão tem um tempo maior de persistência no solo do que a biomassa.

Para o fósforo o maior valor foi encontrado no tratamento BBC100, 308,84 mg dm⁻³, solo com inserção de biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar com dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹, porém não houve significância em relação aos

tratamentos BBC, BP+BCP25, BBC25, BCP100, BBC50, SC25, BCP25 e BB+BCP. Borges *et al.* (2020) trabalhando com biocarvão da palha da cana-de-açúcar encontraram um valor de P de 174 mg dm^{-3} em solo arenoso.

De modo geral, observou-se um alto teor deste parâmetro em todos os tratamentos quando comparado ao solo inicial, Tabela 2, que apresentou um valor de $20,3 \text{ mg dm}^{-3}$. Pois mesmo quando se analisa os valores de P no tratamento controle, exclusivo ou com doses de ADN, nota-se valores elevados como no SC25 – $245,92 \text{ mg dm}^{-3}$. Sendo que o menor valor foi de $131,80 \text{ mg dm}^{-3}$ obtido no tratamento controle em combinação com dose correspondente a $50 \text{ kg de N ha}^{-1}$.

Uma possível explicação para esses altos teores se dá em relação a aplicação dos resíduos orgânicos e biocarvões em combinação com adubação fosfatada, que colaboraram para altos concentrações de P no solo. O aumento do fósforo solúvel no solo normalmente ocorre através da aplicação de fertilizantes minerais solúveis (superfosfatos, termofosfatos e fosfatos de amônio), ou de matéria orgânica com razoável teor de fósforo e, a solubilização do P, envolve transformações que são realizadas por microrganismos durante o processo de mineralização/imobilização da MO (STAMFORD *et al.*, 2008).

Biocarvões produzidos a partir de matérias-primas, como esterco de gado, madeira, cama de frango e resíduos de culturas, melhoram a disponibilidade de P no solo (UZOMA *et al.*, 2011; KLOSS *et al.*, 2012; GAO *et al.*, 2016). Alves *et al.* (2021) em seu estudo com biocarvão produzido da mistura de bagaço e biossólido, encontrou maior valor para o P no solo de $137,58 \text{ mg dm}^{-3}$, já para o solo com biocarvão de biossólido obteve valor de $210,80 \text{ mg dm}^{-3}$. No presente estudo a mistura de biocarvões com maior valor foi no tratamento BB+BBC – $226,52 \text{ mg dm}^{-3}$. E, para o biocarvão de biossólido foi no BB25 com valor de $195,70 \text{ mg dm}^{-3}$.

O teor de sulfato apresentou maior valor, $82,36 \text{ mg dm}^{-3}$, no tratamento com adição de bagaço de cana-de-açúcar em combinação com dose correspondente a $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$, porém não houve significância em relação ao BCP25. Quanto ao biocarvão, o maior teor desse parâmetro foi no BB50, $54,72 \text{ mg dm}^{-3}$. E, o solo controle apresentou menor teor de sulfato. De modo geral, os valores de teor de sulfato foram classificados como altos, exceto para os SC, BBC e BBC100 que apresentaram valores médios conforme a classificação do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

Foi realizada a análise de alumínio trocável (Al^{+3}) e saturação por alumínio (m%) porém seus teores no solo foram nulos.

Para a acidez potencial do solo, o maior valor foi encontrado no BCP100, não apresentando significância apenas em relação ao SC50. Para este parâmetro, os tratamentos que receberam biossólido e biocarvão de biossólido, exclusivos ou em combinação com doses de nitrogênio, evidenciaram menores valores.

Foram encontrados maiores valores para o potássio no BCP25, BCP e BBC, os mesmos obtiveram um médio teor de potássio no solo – 3,08; 2,92 e 2,58 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Enquanto o BP50 apresentou um valor de 0,12 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ considerado muito baixo. Devido ao elevado teor de cálcio, nos tratamentos com adição de biossólido, pode ter ocorrido a lixiviação do potássio (TAMMEORG *et al.*, 2014).

Alves *et al.* (2021) encontraram menores valores de potássio 0,60 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ trabalhando com biocarvão de biossólido e, trabalhando com mistura de biocarvão de biossólido e bagaço de cana-de-açúcar obtiveram valores de: 0,40; 0,50; 0,60 e 0,80 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ em seu estudo. Enquanto no presente estudo obteve valores de 1,32; 1,24; 0,96; 0,88 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para os tratamentos que receberam BB, exclusivo ou combinado com ADN. E, 1,54; 1,28; 1,02 e 0,86 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ da mistura dos biocarvões.

Para o elemento cálcio notou-se que onde havia inserção de biossólido e seu respectivo biocarvão, exclusivo ou em conjunto com fertilizante nitrogenado, houve um aumento significativo de 4,97 vezes em relação aos tratamentos que evidenciaram menores valores. E também apresentaram significância em relação aos demais tratamentos.

Esse elevado teor de cálcio no solo pode estar relacionado ao tratamento que o biossólido recebe na ETE's, pois esse resíduo normalmente passa por um tratamento com cal virgem dolomítico com óxido de cálcio, com finalidade de eliminar ou reduzir patógenos (BARROS *et al.*, 2011). Alves *et al.* (2021) em seu estudo encontraram valores de 29,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ em solo com aplicação de biocarvão de biossólido, valor este inferior ao do presente estudo.

Já para o magnésio o maior valor foi de 16,56 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ obtido no SC50 e 12,42 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ no BP+BCP25 apresentando significância em relação aos demais tratamentos. Valores estes considerados elevados. Mas, de maneira geral, pode-se dizer que o Mg só apresentou baixos teores nos tratamentos BCP100, BB+BBC25, BP, BB+BBC, BBC100, BB+BBC100, BP+BCP50, BBC25, BBC e BP+BCP100. Alves *et al.* (2021) obtiveram valor de 9,3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ em solo com adição de biocarvão de lodo de esgoto. Corroborando com o valor obtido no presente estudo para o solo com BB – 9,38 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Os valores mais elevados da SB foram obtidos nos tratamentos que havia inserção de biossólido e seu respectivo biocarvão, individuais ou combinados com fertilizantes nitrogenados, possivelmente este parâmetro foi influenciado devido aos altos teores de cálcio. E o menor valor foi obtido no solo com BBC100, porém não houve significância em relação ao SC, SC25, SC50, SC100, BCP, BCP25, BCP50, BCP100BBC, BBC, BBC25, BBC50, BBC100.

A capacidade de troca catiônica do solo (CTC) é de suma importância, principalmente em relação a fertilidade do solo, pois indica a capacidade total de reter cátions, que posteriormente tornar-se-ão disponíveis as plantas (SOUZA; LIMA; TEIXEIRA, 2009). Para a CTC os tratamentos com BP e BB, exclusivos ou combinados com ADN, apresentaram um aumento significativo de 3,29 vezes em relação aos tratamentos que evidenciaram menores valores. E tiveram significância em relação aos demais tratamentos.

A CTC do solo pode variar muito de acordo com as diferentes matérias-primas e temperatura de pirólise que o material é produzido (CELY *et al.*, 2015). No capítulo de caracterização dos materiais, a CTC tanto do BP quanto do BB apresentaram valores elevados, de 865,93 e 725,14 mmol_c kg⁻¹, quando comparados ao do BCP e BBC, 112,39 e 52,00 mmol_c kg⁻¹.

Quando se compara os valores do solo, antes da correção com a calagem e inserção dos resíduos orgânicos, observa-se que o mesmo encontrava-se com uma saturação por bases abaixo de 50% (Tabela 2). Com a correção com calcário houve uma elevação desse parâmetro, porém, destaca-se os tratamentos com inserção de biossólido e seu respectivo biocarvão, exclusivos ou combinados com ADN, que obtiveram valores superiores a 90%. O mesmo ocorreu para o solo com mistura de resíduos e biocarvões, exclusivos ou combinados com a adubação nitrogenada (Tabela 4).

Tabela 4 – Atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas 140

(continua)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	pH	MO	COT	P	S-SO ₄ ²⁻	(H+Al)	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
		-----(g dm ⁻³)----			-----(mg dm ⁻³)----		------(mmolc dm ⁻³)-----						
SC	0	6,74 c	11,76 d	6,82 d	210,32 b	7,66 d	10,82 b	1,74 b	40,12 e	9,38 b	51,24 e	62,06 e	82,57 b
	25	6,66 d	12,86 d	7,46 d	245,92 a	17,70 d	10,90 b	0,68 b	48,86 e	7,62 b	57,16 e	68,06 e	83,98 b
	50	6,54 d	10,82 d	6,28 d	131,80 b	33,92 c	11,36 a	0,32 c	30,88 e	16,56 a	47,76 e	59,12 e	80,78 c
	100	6,62 d	13,68 c	7,94 c	197,42 b	11,36 d	10,90 b	0,30 c	48,82 d	7,64 b	56,76 e	67,66 e	83,89 b
BP	0	7,64 a	15,72 c	9,12 c	163,50 b	25,08 c	6,60 e	0,16 c	272,14 a	4,56 c	276,86 a	283,46 a	97,67 a
	25	7,74 a	15,02 c	8,71 c	172,52 b	22,82 d	6,18 e	0,16 c	272,24 a	7,90 b	280,30 a	286,48 a	97,84 a
	50	7,82 a	15,24 c	8,84 c	148,34 b	22,24 d	5,96 e	0,12 c	267,76 a	5,18 c	273,06 a	279,02 a	97,86 a
	100	7,72 a	15,36 c	8,91 c	151,28 b	34,54 c	6,16 e	0,44 c	260,00 a	7,42 b	267,86 a	274,02 a	97,75 a
BCP	0	6,90 c	21,04 a	12,20 a	172,60 b	14,90 d	9,92 c	2,92 a	42,60 e	8,06 b	53,58 e	63,50 e	84,38 b
	25	6,58 d	24,36 a	14,13 a	241,78 a	73,16 a	11,06 b	3,08 a	60,38 e	10,02 b	73,48 e	84,54 e	86,92 b
	50	6,56 d	21,50 a	12,47 a	196,66 b	54,26 b	10,76 b	0,98 b	42,68 e	11,10 b	54,76 e	65,52 e	83,58 b
	100	6,36 d	22,22 a	12,89 a	258,12 a	82,36 a	11,88 a	0,68 c	61,80 e	4,94 c	67,42 e	79,30 e	85,02 b
BP+BCP	0	7,46 b	17,42 c	10,10 c	206,56 b	20,96 d	7,22 d	0,68 c	176,12 c	9,94 b	186,74 c	193,96 c	96,28 a
	25	7,50 b	18,36 b	10,65 b	269,68 a	32,42 c	7,30 d	0,32 c	210,32 b	12,42 a	223,06 b	230,36 b	96,83 a
	50	7,32 b	15,20 c	8,82 c	173,84 b	30,68 c	7,36 d	1,08 b	189,22 c	3,20 c	193,50 c	200,86 c	96,34 a
	100	7,40 b	14,74 c	8,55 c	200,66 b	33,10 c	7,16 d	0,94 b	122,88 d	3,08 c	126,90 d	134,06 d	94,66 a
BB	0	7,46 b	16,84 c	9,77 c	194,40 b	27,48 c	6,38 e	1,32 b	248,10 a	9,38 b	258,80 a	265,18 a	97,59 a
	25	7,70 a	16,20 c	9,40 c	195,70 b	34,76 c	6,26 e	1,24 b	244,50 a	8,44 b	254,18 a	260,44 a	97,60 a
	50	7,72 a	16,60 c	9,63 c	155,00 b	54,72 b	6,26 e	0,96 b	236,98 a	7,18 b	245,12 a	251,38 a	97,51 a
	100	7,72 a	15,10 c	8,76 c	147,92 b	39,38 c	6,44 e	0,88 b	252,46 a	6,16 c	259,50 a	265,94 a	97,58 a

Tabela 4 – Atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas

(conclusão)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	Ph	MO	COT	P	S-SO ₄ ²⁻	(H+Al)	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
		----- (g dm ⁻³) ----			----- (mg dm ⁻³) ----		----- (mmolc dm ⁻³) -----						
BBC	0	6,90 c	10,10 d	5,86 d	282,52 a	9,52 d	9,22 c	2,58 a	34,30 e	3,08 c	39,96 e	49,18 e	81,25 c
	25	6,72 c	11,20 d	6,50 d	264,06 a	15,38 d	10,04 c	1,42 b	38,96 e	3,20 c	43,58 e	53,62 e	81,28 c
	50	6,70 c	10,42 d	6,04 d	255,32 a	24,72 c	9,80 c	1,38 b	40,16 e	5,42 c	46,96 e	56,76 e	82,73 b
	100	6,66 d	12,22 d	7,09 d	308,84 a	9,68 d	10,44 b	1,08 b	32,22 e	4,32 c	37,62 e	48,06 e	78,28 c
BB+BBC	0	7,50 b	13,90 c	8,06 c	226,52 a	24,26 c	6,88 d	1,54 b	160,68 c	4,34 c	166,56 c	173,44 c	96,03 a
	25	7,62 a	14,56 c	8,45 c	186,86 b	26,26 c	6,60 e	1,28 b	189,28 c	4,66 c	195,22 c	201,82 c	96,73 a
	50	7,64 a	13,72 c	7,96 c	174,28 b	21,42 d	6,68 e	1,02 b	177,52 c	5,48 c	184,02 c	190,70 c	96,50 a
	100	7,62 a	13,90 c	8,06 c	180,22 b	16,16 d	6,60 e	0,86 b	207,96 c	4,32 c	213,14 b	219,74 b	97,00 a
CV (%)		2,03	14,23	14,29	17,97	39,82	6,81	29,57	13,20	49,28	12,94	12,24	1,74

Fonte: A autora

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. pH: potencial hidrogeniônico; MO: Matéria orgânica; COT: Carbono orgânico total; P: Fósforo; S-SO₄²⁻: Teor de sulfato; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (p<0,05).

Ainda em relação a Tabela 4, observa-se que quando avalia-se somente a inserção dos resíduos orgânicos e biocarvões sem adubação, por exemplo, o teor de sulfato apresentou um maior valor no BB, BP e na mistura de ambos com o bagaço de cana-de-açúcar puro e pirolisado. Já quando se avalia esse parâmetro com os materiais mais as dosagens de fertilizantes nitrogenados, há uma mudança, o tratamento com bagaço apresenta um maior teor – de 14,90 mg dm⁻³ aumenta para 82,36 mg dm⁻³. Ou seja, a elevação desse elemento no solo pode estar relacionado com a adubação nitrogenada.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos micronutrientes presentes em solos com adição de resíduos orgânicos e biocarvões após o plantio da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Analisando os valores do boro, nota-se que o BB+BBC25 apresentou um baixo teor para esse elemento no solo. Enquanto o maior valor foi obtido no BP+BCP50, porém evidenciou um médio teor. Esse elemento é móvel no solo e é sujeito a lixiviação, principalmente em solos arenosos, sendo que a deficiência do boro pode retardar o crescimento das plantas, afetando primeiro os pontos de crescimento e as folhas novas (IPNI, 1998).

Já para o cobre observa-se que onde foi adicionado bio sólido e mistura de bio sólido com bagaço de cana-de-açúcar, individual ou combinado com ADN, houve um alto teor desse elemento. Verifica-se ainda que mesmo no BBC, onde obteve o menor valor, havia um alto teor de cobre. Sendo que todos os tratamentos, puros ou em combinação com fertilizante nitrogenado, apresentaram resultados superiores a 0,80 mg dm⁻³.

Alves *et al.* (2021) encontraram valores de 2,43 mg dm⁻³ em solos com aplicação de biocarvão de lodo de esgoto e, 1,65 mg dm⁻³ com aplicação de biocarvão de bagaço e biocarvão de lodo. Valores esses próximos aos obtidos no presente trabalho, onde os solos com adição de biocarvão de bio sólido apresentaram um teor de cobre de 2,08; 2,00; 1,96 e 1,82 mg dm⁻³. E as misturas dos biocarvões de 1,92; 1,90; 1,88 e 1,80 mg dm⁻³.

O BCP50 apresentou maior valor para o ferro de 30,26 mg dm⁻³, enquanto o BB+BBC50, 13,80 mg dm⁻³, obteve menor resultado. Porém, os valores encontrados para esse elemento no solo foram elevados, ou seja, maiores que 12 mg dm⁻³. Para o Mn, o BCP25 evidenciou um médio teor de 3,24 mg dm⁻³.

Os maiores teores de zinco no solo foram identificados nos BP25, BP100, BP50, BB25, BP, BB50 e BB. E, o menor valor foi obtido no SC50, não diferindo do SC, SC25, SC100, BCP50 e BBC100. Porém esse elemento nos solos apresentou teores maiores que $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$. Alves *et al.* (2021) em seu estudo com biocarvões encontraram valores superiores de ferro, manganês e zinco no solo após o plantio da beterraba.

Tabela 5 – Micronutrientes em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	----- (mg dm ⁻³) -----				
		B	Cu	Fe	Mn	Zn
SC	0	0,37 a	2,04 b	23,50 a	2,08 b	2,04 e
	25	0,31 b	2,28 b	20,48 b	1,86 b	2,54 e
	50	0,33 b	2,00 b	18,66 b	1,86 b	1,74 e
	100	0,32 b	2,14 b	26,66 a	2,44 a	3,48 d
BP	0	0,48 a	3,44 a	25,08 a	2,56 a	8,58 a
	25	0,37 a	3,48 a	22,68 a	2,70 a	9,08 a
	50	0,41 a	3,50 a	28,66 a	2,46 a	9,04 a
	100	0,44 a	3,34 a	24,58 a	2,78 a	9,08 a
BCP	0	0,36 a	2,08 b	18,02 b	2,72 a	3,32 d
	25	0,47 a	2,04 b	28,32 a	3,24 a	3,26 d
	50	0,38 a	2,28 b	30,26 a	2,94 a	2,84 e
	100	0,41 a	2,26 b	23,64 a	2,58 a	3,14 d
BP+BCP	0	0,40 a	3,18 a	21,66 a	2,74 a	6,92 b
	25	0,51 a	3,44 a	23,16 a	2,86 a	7,18 b
	50	0,55 a	3,30 a	21,24 a	2,76 a	7,48 b
	100	0,44 a	2,66 b	22,50 a	2,84 a	6,60 b
BB	0	0,54 a	2,00 b	17,72 b	2,40 a	8,26 a
	25	0,37 a	2,08 b	22,18 a	2,42 a	8,70 a
	50	0,24 b	1,96 b	20,22 b	2,60 a	8,50 a
	100	0,25 b	1,82 b	18,52 b	2,14 a	7,18 b
BBC	0	0,26 b	1,66 b	16,12 b	1,72 b	4,00 d
	25	0,32 b	1,98 b	19,68 b	1,80 b	3,52 d
	50	0,38 a	2,06 b	20,00 b	1,88 b	3,02 d
	100	0,33 b	1,78 b	15,42 b	1,90 b	2,64 e
BB+BBC	0	0,37 a	1,88 b	15,40 b	1,86 b	5,62 c
	25	0,15 b	1,80 b	14,58 b	1,72 b	5,72 c
	50	0,26 b	1,90 b	13,80 b	1,72 b	4,58 d
	100	0,47 a	1,92 b	13,90 b	2,02 b	5,96 c
CV (%)		36,07	22,39	21,47	35,56	21,39

Fonte: A autora.

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. B: Boro; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Quando realizou-se a caracterização tanto dos resíduos orgânicos quanto dos biocarvões, no capítulo I. Observou-se que o biossólido e seu respectivo biocarvão apresentaram maiores teores de P, Ca, Mg, teor de sulfato, Cu, Fe, Mn e Zn. E, já o bagaço de cana-de-açúcar e seu biocarvão apresentaram maior teor para o K.

Mas, analisando a interação dos materiais com o sistema solo, nota-se que, principalmente, para o fósforo e magnésio o solo em que foi inserido biossólido, exclusivo ou combinado com adubação nitrogenada, se equipararam ou apresentaram resultados inferiores ao tratamento com bagaço de cana-de-açúcar.

Supõe-se aqui, que como o resíduo orgânico (BP) apresentou uma relação C/N menor que 10, pode ter ocorrido um processo mais rápido de mineralização da matéria orgânica, pois a mesma poderia estar em formas mais lábeis quando comparada ao solo com inserção de bagaço. Podendo ainda estar relacionado a uma maior disponibilidade de nutrientes para a planta o que geraria uma maior produtividade nos tratamentos que receberam adição de biossólido.

Pois, quando a relação C/N é menor que 20 há um predomínio da mineralização em relação a imobilização, de modo que a matéria orgânica funcionará como fonte de nutrientes, aumentando assim a disponibilidade destes as plantas (PAUL; CLARK, 2007; CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

Quanto aos biocarvões, alguns autores mencionam que incrementos na fertilidade do solo foram verificados em estudos com aplicação de biocarvões produzidos de diferentes matérias-primas e, em diferentes culturas, observaram também redução nas concentrações de alguns nutrientes, como P, K, Mg e Ca (JEFFERY *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2014; SMIDER; SINGH, 2014; ORAM *et al.*, 2014; SOINNE *et al.*, 2014; TAMMEORG *et al.*, 2014; SOUSA, 2015).

- Correlação dos atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas

A correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre variáveis quantitativas (FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2014).

A Figura 26 apresenta as variáveis químicas do solo em uma matriz de correlação de Pearson, onde verifica-se que a acidez potencial apresentou uma forte correlação negativa com pH ($r = -1$), Ca, SB, CTC, V ($r = -0,9$), N ($r = -0,7$) e Zn ($r = -0,8$). Ou seja, à medida que aumenta o teor desses elementos, há uma redução da acidez potencial no solo. Esse parâmetro evidenciou ainda uma baixa correlação positiva, variando de 0,1 a 0,4 com o P, K, Fe, Mg, teor de sulfato, matéria orgânica e carbono orgânico. E, uma correlação negativa fraca com o Cu e B, variando de -0,1 a -0,2.

O potássio e o fósforo também apresentaram correlação negativa com pH, N, Ca, CTC, V, Fe, Cu e Mn, apresentando variação de -0,2 a -0,4. O P ainda teve uma correlação negativa fraca com o Mg.

A soma de bases evidenciou uma correlação negativa fraca com K ($r = -0,4$) e positiva com Ca ($r = 1$). Para o magnésio não apresentou significância ($p < 0,05$). O K ($r = -0,4$) e o Mg ($r = -0,1$) tiveram uma correlação negativa com o Ca.

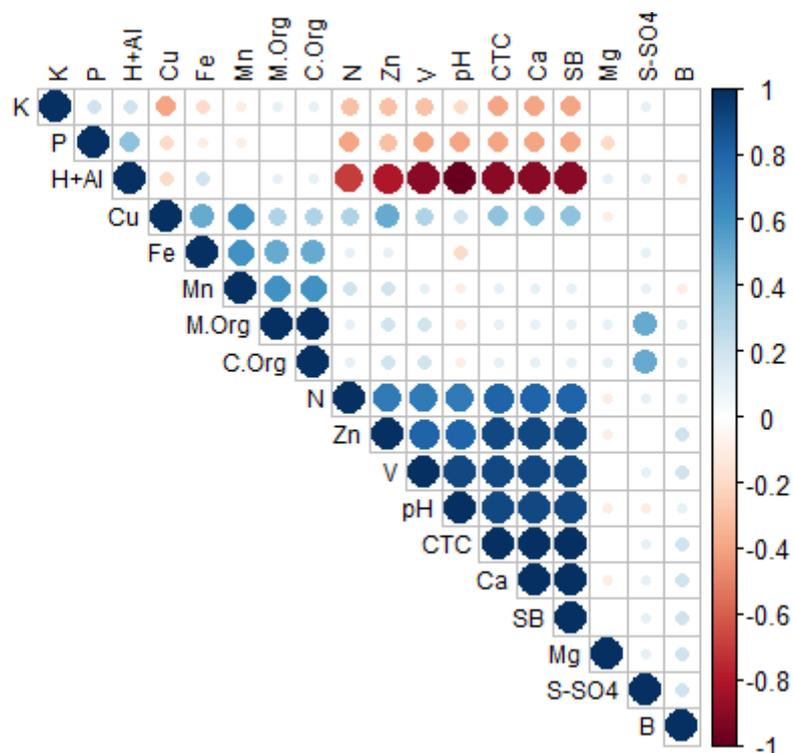
Já o cálcio teve uma forte correlação positiva CTC, pH, V, N e Zn. Com isso pode-se dizer que o cálcio foi o elemento que mais influenciou na capacidade de troca catiônica do solo. Como foi evidenciado nos tratamentos, pois onde havia aplicação de biossólido e seu respectivo biocarvão houve um aumento significativo da CTC e da saturação por bases.

Para o teor de sulfato, ferro, manganês e cobre verificou-se que os mesmos tiveram uma maior correlação positiva com a matéria orgânica e com carbono em comparação com os demais parâmetros.

A matéria orgânica e o carbono apresentaram uma correlação positiva com quase todos os parâmetros, exceto para o pH ($r = -0,1$). E, não apresentou significância ($p < 0,05$) em relação ao fósforo.

Os micronutrientes, Fe, Cu, Mn e Zn apresentaram correlação positiva entre si, já o boro obteve uma baixa correlação positiva com o Zn e, uma correlação negativa de -0,1 com o manganês.

Figura 26 – Matriz de correlação de Pearson dos atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas



Fonte: A autora.

Legenda: pH: Potencial hidrogeniônico; M.Org: Matéria orgânica; C.Org: Carbono orgânico; N: Nitrogênio total; P: Fósforo; S-SO₄²⁻: Teor de Sulfato; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco. Cores azuis e vermelhas indicam correlações positivas e negativas, respectivamente. Espaços vazios indicam que as correlações não são estatisticamente significativas a $p < 0,05$, teste t.

- Análise de componentes principais dos atributos químicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões

Hongyu, Sandanielo e Oliveira Junior (2015, *apud* JOHSON; WICHERN, 1998) mencionam que a PCA é uma técnica da estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de mesma dimensão denominadas componentes principais. Onde cada componente principal vem a ser uma combinação linear de todas as variáveis originais, sendo independentes entre si e estimadas com finalidade de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação em termos da variação total contida nos dados.

Essa análise se torna útil para análise exploratória de dados, permitindo visualizar melhor a variação presente em um conjunto de dados com muitas variáveis. Ela vai identificar quais amostras são semelhantes ou diferentes uma das outras. De

modo que por meio da PCA identifica-se grupos de amostras semelhantes e, verifica-se também quais variáveis tornam um grupo diferente do outro.

Podendo ainda ser utilizada para geração de índices e agrupamento de indivíduos. Pois a PCA agrupa indivíduos de acordo com sua variação (HONGYU; SANDANIELO; OLIVEIRA JUNIOR, 2015).

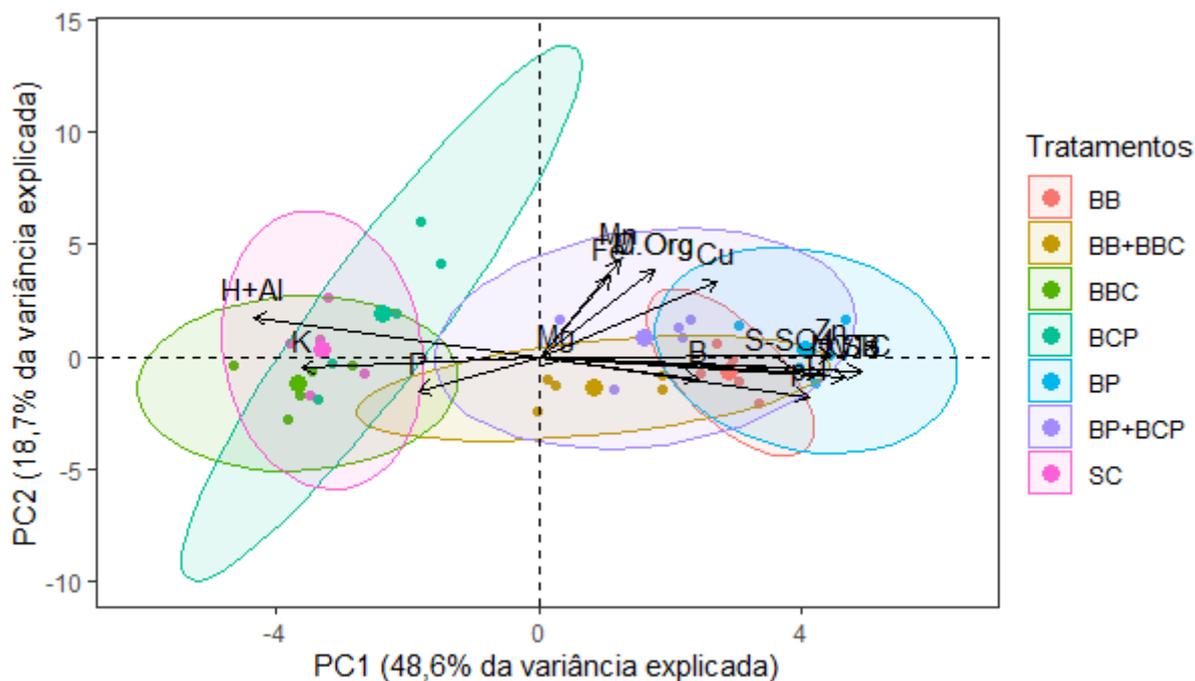
A Figura 27 apresenta as variáveis químicas do solo sob influência de resíduos orgânicos e biocarvões. A PC1 apresentou 48,6% da variância explicada, enquanto para na PC2 verificou-se 18,7%.

Pode-se dizer que os tratamentos interferem na química dos solos de maneira diferente. O círculo azul que representa o conjunto de amostras de solo com inserção de bio sólido, indicando pelos autovetores que tende a ter mais Ca, SB, CTC, V, pH, N, Zn e Cu em relação aos demais tratamentos.

Já o círculo rosa que representa o tratamento controle está com maior teor de acidez potencial, porém o BCP e o BBC também apresentaram, quando comparado aos demais. O tratamento que recebeu inserção de BBC apresentou um maior teor de fósforo.

Foram observados maior teor de matéria orgânica e carbono no BCP e BP+BCP. Nesse último ainda foi observado um maior teor de Mg. Notou-se um maior teor de sulfato e boro no BB e no BP.

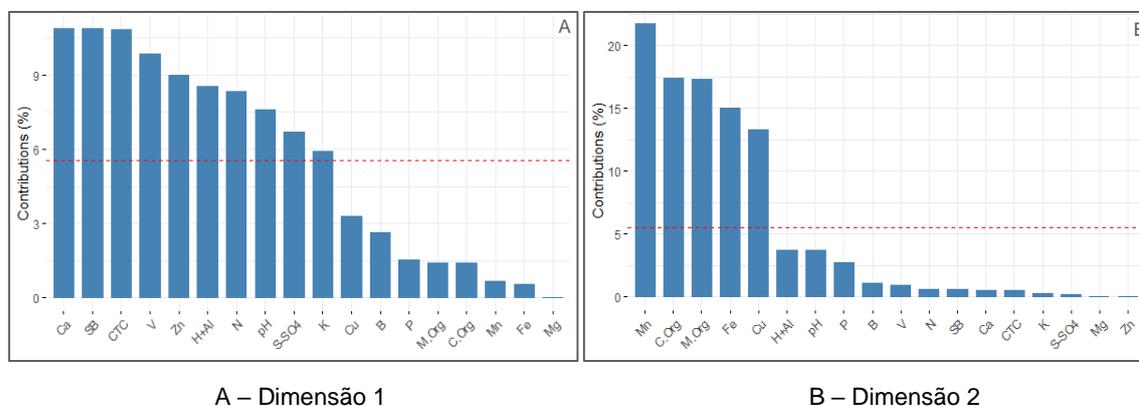
Figura 27 – Análise de componentes principais das variáveis químicas do solo sob influência de resíduos orgânicos e biocarvão sem adubação nitrogenada



Fonte: A autora.

As variáveis Ca, SB, CTC, V, Zn, H+Al, N, pH, teor de sulfato e K foram os que apresentaram maiores contribuições para a PC1 (Figura 28a). Já para a PC2 os parâmetros que mais contribuíram foram o Mn, carbono orgânico total, matéria orgânica, Fe e Cu (Figura 28b). Nota-se ainda que o B, P e o Mg tiveram pouca contribuição nas dimensões 1 e 2.

Figura 28 – Gráficos de contribuição das variáveis químicas do solo nas dimensões



A – Dimensão 1

B – Dimensão 2

Fonte: A autora.

3.1.1.1. Carbono e nitrogênio do solo sob influência de resíduos orgânicos e biocarvões

A Tabela 6 apresenta os resultados do nitrogênio total, amônio, nitrato, carbono orgânico total e relação C/N presentes em solos com adição de resíduos orgânicos e biocarvões após o plantio da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Para o N-total na profundidade de 0-5 cm, observou-se um maior valor no tratamento com inserção de biocarvão de biossólido em combinação com dose correspondente a 50 kg de N ha⁻¹, de 638,90 mg kg⁻¹. E, no tratamento com biossólido na dose de 50 kg de N ha⁻¹, com valor de 627,68 mg kg⁻¹. Ambos apresentaram significância em relação aos demais tratamentos. Comparando esses valores obtidos ao do solo controle na dose correspondente a 50 kg de N ha⁻¹ (43,70 mg kg⁻¹), nota-se que houve um aumento significativo.

Os tratamentos com BB50 e BP50 evidenciaram, na profundidade de 0-5 cm, um aumento de 12 vezes no teor de N-total em relação aos menores valores obtidos nos tratamentos. Já na profundidade de 5-10 cm, o BB50 e o BP25 tiveram um incremento de N-total de 2,27 vezes comparado aos menores valores apresentados na Tabela 6. Esse aumento do teor de nitrogênio orgânico no solo que recebeu adição de biossólido e seu respectivo biocarvão, pode ter ocorrido porque o biossólido produzido nas estações de tratamento de esgoto é um resíduo rico em nitrogênio, o que significa que possuem alto potencial para serem utilizados como fertilizantes nitrogenados (BACKES *et al.*, 2009).

E, segundo Tian *et al.* (2014), o uso de biocarvão de biossólido pode aumentar a produção agrícola pelo incremento de matéria orgânica e fornecimento de nutrientes como o nitrogênio e fósforo. Pois, o biocarvão contém C e N lábil podendo liberar esses elementos na forma orgânica no solo (Liang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015). Porém, a qualidade do biocarvão depende do tipo e fonte da matéria-prima utilizada para sua produção (MENDEZ *et al.*, 2013).

O solo com adição de BB+BBC100, na profundidade de 0-5 cm, também apresentou significância em relação aos demais tratamentos. Evidenciando um valor de 543,50 mg kg⁻¹ de N-total. Li, Liang e Shangguan (2017) encontraram um aumento de C-orgânico e N-orgânico em solo com inserção de biocarvão de cultura.

Os menores teores de nitrogênio total foram encontrados nos tratamentos BBC100, BCP, SC50, BCP100, BB+BBC25 e BBC50.

Já para a profundidade de 5-10 cm, nota-se que o maior valor continua sendo no BB50. Porém, quanto ao solo que recebeu BP em conjunto com dose correspondente a 50 kg de N ha⁻¹ houve uma redução significativa do teor de nitrogênio total, na camada de 5-10 cm, apresentando valor bem inferior ao da camada anterior – 109,64 mg kg⁻¹. Já o solo com inserção de BP com dose correspondente a 25 kg de N ha⁻¹, ocorreu um aumento no teor de N-total, não apresentando significância do BB50.

Na profundidade de 5-10 cm, ainda notou-se que os tratamentos com inserção de bagaço obtiveram valores mais elevados do que na camada de 0-5, com exceção do BCP25. O mesmo ocorreu para o solo que recebeu biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar na dose correspondente a 25, 50 e 100 kg de N ha⁻¹. Isso também ocorreu com o solo com BB+BBC25, onde teve um aumento significativo no teor de nitrogênio total (53,36 mg kg⁻¹ para 192,94 mg kg⁻¹).

Alves *et al.* (2021) quando avaliou o nitrogênio total no solo com biocarvão de lodo de esgoto na cultura da beterraba encontrou um valor de 0,86 g kg⁻¹. E, para o solo com incorporação de biocarvão de lodo mais biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar obteve um valor de 0,52 g kg⁻¹. Valores estes superiores ao achados no presente trabalho.

Grande parte do N-total presente no solo está na forma orgânica (MALAVOLTA, 2006). Esse N é controlado principalmente pela mineralização e imobilização, processos simultâneos que ocorrem durante a degradação ou decomposição de materiais orgânicos e da matéria orgânica do solo pela população microbiana heterotrófica (YAMADA; ABDALLA; VITTI, 2007).

Na mineralização o nitrogênio orgânico é convertido em N mineral (NH₄⁺ e NO₃⁻). Porém esse processo depende de alguns fatores como: atividade microbiana (pH, umidade e temperatura), teor de carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo presentes na MO. A disponibilidade de nitrogênio para as plantas é limitada pelos processos de mineralização e nitrificação da MOS, onde o N-orgânico é convertido em amônio e, posteriormente em nitrato pelas bactérias *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002).

Os maiores valores de amônio a 0-5 cm foram no solo com BP+BCP na dose correspondente a 50 kg de N ha⁻¹. Porém, de modo geral, notou-se que os tratamentos com inserção de BP+BCP, BB e BP não apresentaram significância entre si, com exceção do tratamento com bio sólido na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹. Já

na profundidade de 5-10 cm o solo com BP50 obteve um valor de 5,24 mg kg⁻¹ e evidenciou significância em relação aos demais tratamentos. Enquanto o BBC50 apresentou menor resultado, mas não teve significância em relação ao BP, BBC50, BBC100 e BB+BBC.

Quanto ao NO₃⁻ (0-5 cm) o maior valor foi no SC25, que teve significância em relação aos demais tratamentos – 6,19 mg kg⁻¹. O solo com inserção de BP+BCP também evidenciou significância em relação aos demais tratamentos. Na profundidade de 5-10 cm a maioria dos resultados foram inferiores aos da profundidade de 0-5 cm, com exceção do solo com adição de BP25, BCP, BCP25, BCP50, BBC25 e BB+BBC50. Porém o maior valor foi no SC25 e no BP25. E, os menores no BBC50 e BBC100.

Sousa (2015) trabalhando com aplicação de doses variadas de biocarvão de lodo de esgoto no solo, em vasos, na cultura do rabanete encontrou valores superiores variando de 12,22 a 41,91 mg kg⁻¹ de NO₃⁻ e, 8,54 a 18,49 mg kg⁻¹ de NH₄⁺, não corroborando com os resultados encontrados no presente estudo.

Alguns estudos relatam que a aplicação do biocarvão em solo pode acelerar as transformações inorgânicas do nitrogênio no solo, aumentando a mineralização líquida de N, a nitrificação e a denitrificação (NELISSEN *et al.*, 2012; SONG *et al.*, 2013; CAYUELA *et al.*, 2013; ZHANG, VORONEY; PRICE, 2015). Já outros mencionam que não há efeito de adições de biocarvão nas transformações inorgânicas do N (SCHOMBERG *et al.*, 2012; CHENG *et al.*, 2012).

Os biocarvões têm sido utilizados como forma de mitigar perdas de nitrogênio na agricultura, retendo N de fertilizantes adicionados ou de resíduos orgânicos ricos em N co-compostados (GONZÁLEZ *et al.*, 2015, ZHENG *et al.*, 2013; KAMMANN *et al.*, 2015; KARHU *et al.*, 2021). Tanto que quando se observa valores de amônio e nitrato nas duas profundidades para o BB, individual ou combinado com ADN, nota-se que houve uma redução na profundidade de 5-10 cm no solo. Já quanto ao BBC e BB+BBC, exclusivos ou combinados com fertilizantes N, houve variação entre os resultados.

Quando se compara o teor de NH₄⁺ e NO₃⁻ na camada de 0-5 cm do solo, nota-se que, de maneira geral, houve predominância de amônio no solo com inserção de BCP e BB individual e nas doses correspondentes a 25, 50 e 100 kg de N ha⁻¹. E também, na profundidade de 5-10 cm no solo com inserção de biossólido mais bagaço de cana-de-açúcar individual e combinado com fertilizante N. Nos demais tratamentos

houve uma certa variação dos teores de amônio e nitrato no solo tanto na profundidade de 0-5 cm como na de 5-10 cm.

De modo geral, o NH_4^+ e NO_3^- em ambas as profundidades apresentaram valores relativamente baixos no solo. Isso pode estar relacionado ao fato de que as gramíneas são excelentes extratoras de nitrogênio do solo (PRIMAVESI *et al.*, 2001; CANTARELLA *et al.*, 2003; COSTA *et al.*, 2008). Também pode ser que o processo de mineralização ocorreu de forma mais lenta, o que resultou em valores mais reduzidos de amônio e nitrato no solo.

O processo de mineralização e imobilização estão ligados, principalmente, a relação C/N dos materiais orgânicos. Pois quando se tem uma relação C/N elevada (>30) há um predomínio do processo de imobilização. Já quando se tem uma C/N baixa (<20) predomina a mineralização. E, quando há um predomínio da mineralização, a MOS funciona como fonte de nutrientes, aumentando a disponibilidade dos mesmos as plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; PAUL; CLARK, 2007; CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

O maior valor de relação C/N na profundidade de 0-5 cm foi no tratamento de solo com inserção de BCP. Esse valor elevado da relação C/N no BCP está associado há um menor teor de N-total no solo – 42,12 mg kg⁻¹ e maior teor de carbono (15,06 g dm⁻³). Podendo estar relacionado há uma deficiência de N no solo em razão da presença de resíduo vegetal rico em carbono e pobre em N, que é o caso do bagaço de cana-de-açúcar. O BP50 e o BB50 obtiveram uma C/N<20, indicando um certo equilíbrio entre o C e N presentes no solo. Já na profundidade de 5-10 cm o SC50 e BCP apresentaram uma relação C/N elevada, enquanto o BP25 e BB50 evidenciaram valores C/N <30.

O solo que recebeu o bagaço de cana-de-açúcar e seu respectivo biocarvão, individual ou combinado com adubação nitrogenada, evidenciou valores elevados de relação C/N. Isso pode indicar que houve predomínio do processo de imobilização temporária de N em relação a mineralização nesses tratamentos. Pois biocarvão produzido a partir de matérias-primas lignocelulósicas com baixo teor de nutrientes pode causar imobilização líquida de N a curto prazo (GUL; WHALEN, 2016).

Tabela 6 – Valores de nitrogênio total, amônio, nitrato, carbono orgânico total e relação C/N em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas (continua)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	N-Total		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		COT		C/N	
		0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10
		------(mg kg ⁻¹)-----						------(g dm ⁻³)-----			
SC	0	132,83 g	61,72 f	3,09 a	3,44 b	3,77 c	3,10 b	8,32 e	8,50 b	62,64 d	137,72 b
	25	106,47 h	119,72 e	2,10 b	2,15 d	6,19 a	3,97 a	8,36 e	8,80 b	78,52 c	73,50 c
	50	43,70 i	41,28 f	3,18 a	2,36 c	2,64 d	2,05 c	7,62 e	8,30 b	174,37 b	201,07 a
	100	162,71 g	133,57 e	2,83 b	2,71 b	3,02 d	1,51 c	8,12 e	8,94 b	49,90 d	66,93 c
BP	0	438,97 c	294,54 b	3,80 a	1,24 e	1,38 e	1,35 d	10,06 d	10,38 b	22,92 d	35,24 d
	25	308,69 e	380,56 a	4,15 a	3,05 c	1,63 e	3,48 a	10,10 d	10,30 b	32,72 d	27,07 d
	50	627,68 a	109,64 e	3,03 a	5,24 a	4,13 c	1,77 c	10,60 d	9,74 b	16,89 d	88,84 c
	100	462,28 c	293,78 b	1,83 b	1,95 d	1,30 e	1,57 c	11,68 c	10,52 b	25,27 d	35,81 d
BCP	0	42,12 i	67,21 f	3,22 a	3,68 b	1,69 e	1,84 c	15,06 a	11,82 a	357,55 a	175,87 a
	25	164,16 g	123,18 e	2,24 b	1,52 d	1,43 e	1,65 c	14,10 a	13,60 a	85,89 c	110,41 b
	50	118,14 h	198,00 d	1,45 b	2,89 c	1,08 e	1,45 d	12,86 b	11,14 a	108,85 c	56,26 d
	100	48,07 i	109,08 e	2,79 b	2,53 c	1,22 e	0,78 d	12,48 b	12,20 a	259,62 b	111,84 b
BP+BCP	0	159,13 g	88,71 f	4,43 a	2,46 c	5,42 b	1,98 c	11,62 c	12,60 a	73,02 c	142,04 b
	25	141,31 g	178,87 d	3,40 a	2,97 c	3,93 c	2,00 c	10,30 d	9,92 b	72,89 c	55,46 d
	50	232,77 f	109,96 e	4,49 a	2,65 c	3,63 c	2,24 c	9,72 d	9,16 b	41,76 d	83,30 c
	100	162,26 g	147,56 d	3,60 a	3,90 b	2,18 d	2,06 c	9,22 e	10,44 b	56,82 d	70,75 c

Tabela 6 – Valores de nitrogênio total, amônio, nitrato, carbono orgânico total e relação C/N em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	(conclusão)									
		N-Total		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		COT		C/N	
		0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10
		------(mg kg ⁻¹)-----						------(g dm ⁻³)-----			
BB	0	348,27 d	177,99 d	3,28 a	1,53 d	2,93 d	2,23 c	12,50 b	10,80 b	35,89 d	60,68 c
	25	365,60 d	169,05 d	3,44 a	2,82 c	2,26 d	1,67 c	13,04 b	11,98 a	35,67 d	70,87 c
	50	638,90 a	399,69 a	3,63 a	2,42 c	2,97 d	1,76 c	11,34 c	11,50 a	17,75 d	28,77 d
	100	208,89 f	226,82 c	3,40 a	2,08 d	2,50 d	2,06 c	11,48 c	11,50 a	54,96 d	50,70 d
BBC	0	87,91 h	64,00 f	1,90 b	2,41 c	2,28 d	1,89 c	9,08 e	8,80 b	103,29 c	137,50 b
	25	100,85 h	131,28 e	1,50 b	3,85 b	1,87 e	2,86 b	9,12 e	9,36 b	90,43 c	71,30 c
	50	73,20 i	125,55 e	2,18 b	0,45 e	2,27 d	0,73 e	8,96 e	9,22 b	122,40 c	73,44 c
	100	31,88 i	103,35 e	3,63 a	0,98 e	2,64 d	0,65 e	8,24 e	9,24 b	258,47 b	89,40 c
BB+BBC	0	229,37 f	242,96 c	2,37 b	0,83 e	2,61 d	1,28 d	9,72 d	9,98 b	42,38 d	41,08 d
	25	53,36 i	192,94 d	2,10 b	2,61 c	2,59 d	1,37 d	10,22 d	10,36 b	191,53 b	53,70 d
	50	231,55 f	162,52 d	2,74 b	2,28 c	1,67 e	1,82 c	9,42 d	10,22 b	40,68 d	62,88 c
	100	543,50 b	126,03 e	2,01 b	1,40 d	2,43 d	1,06 d	9,74 d	10,12 b	17,92 d	80,30 c
CV (%)		13,28	17,82	21,59	20,61	16,51	22,00	10,14	13,95	29,07	27,46

Fonte: A autora.

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

3.1.2. Atributos biológicos do solo

A Tabela 7 apresenta os resultados da respiração, qCO_2 , $Cmic$, $qMic$, $Nmic$, desidrogenase e FDA presentes em solos com adição de resíduos orgânicos e biocarvões após o plantio da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

A respiração do solo é definida como soma total de todas as funções metabólicas nas quais o CO_2 é produzido (SILVA; AZEVEDO; POLLI, 2007). Ela é um parâmetro que quantifica a atividade microbiana. Sendo dependente do estado fisiológico da célula microbiana e pode ser influenciada por alguns fatores, como umidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes, relação C/N e presença de resíduos orgânicos (TANG *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2010; MOURA *et al.*, 2015).

Ela pode ser correlacionada com variáveis bióticas e abióticas, como atividade microbiana do solo, disponibilidade de substratos, níveis de nutrientes, dinâmica radicular e microclima (ALLISON; WALLENSTEIN; BRADFORD, 2010; TALMON *et al.*, 2011; WAGAI *et al.*, 2013; BOLAT; ÖZTÜRK, 2016; WANG *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2021).

As taxas de emissão de CO_2 foram afetadas pelas inserções dos materiais, o tratamento BCP100 apresentou um maior valor de liberação de CO_2 – 17,99 mg C- CO_2 kg^{-1} solo h^{-1} , porém não houve significância em relação ao BCP25 e BP+BCP25. Rasul *et al.* (2006) mencionam que a adição de torta de filtro de cana-de-açúcar no solo eleva consideravelmente os valores de respiração basal do solo.

Isso pode estar relacionado a uma atividade acelerada dos microrganismos, principalmente, pela maior disposição de matéria orgânica (DA SILVA *et al.*, 2015a), pois, quando se analisa os atributos químicos do solo (Tabela 4) nota-se que os tratamentos que receberam, principalmente, bagaço de cana-de-açúcar obtiveram maiores teores de MOS e conseqüentemente maior liberação de CO_2 . Fator este que pode estar relacionado também com a combinação com fertilizante nitrogenado.

Entretanto, altas taxas de respiração podem indicar um distúrbio ecológico, ou um alto nível de produtividade do ecossistema (ISLAM; WEIL, 2000; TU; RISTAINO; HU, 2006).

A maior liberação de CO_2 pode estar associada à maior atividade biológica, que, por sua vez, está relacionada diretamente com a quantidade de carbono lábil no solo. Porém, elevados valores de respiração do solo nem sempre indicam condições desejáveis. Onde a curto prazo pode significar uma liberação de nutrientes para as

plantas e, a longo prazo, perda de carbono orgânico do solo para a atmosfera (PARKIN; DORAN; FRANCO-VIZCAINO, 1996; CUNHA *et al.*, 2011; ARAÚJO *et al.*, 2019).

Observando os valores de respiração para solo que recebeu biossólido e seu respectivo biocarvão e, também a mistura de ambos, individual ou combinado com ADN, nota-se que os valores, comparados ao tratamento controle, estão mais elevados. Os resultados do presente trabalho se assemelham com Bueno (2010), que menciona que a respiração do solo aumenta em função das doses de lodo aplicadas. E com Prayogo *et al.* (2014), que evidenciaram um aumento na quantidade de biomassa bacteriana pela aplicação de biocarvão no solo.

O menor valor para a taxa de respiração basal foi encontrado no SC e BBC, porém não apresentaram significância em relação ao SC25, SC50, BBC25, BBC50 e BBC100. Isso pode ser explicado por Silveira (2011), que menciona que esses resíduos são mais difíceis de serem decompostos, devido a presença de lignina, o que resulta em menores valores de respiração.

Analisa-se ainda que o tratamento que recebeu apenas bagaço de cana-de-açúcar sem fertilizante nitrogenado obteve um menor valor, quando comparado ao solo com BCP100. Supõem-se que essa maior taxa de respiração nesse tratamento pode ter sido decorrente da combinação de um resíduo lignocelulósico com a dose de N, através da uréia. Pois, a adubação nitrogenada pode alterar as propriedades microbiológicas do solo, como carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, respiração do solo e qCO_2 (RAMOS *et al.*, 2010; COSER *et al.*, 2007).

O quociente metabólico indica a quantidade de CO_2 que é liberado no solo por unidade de biomassa microbiana em um determinado período. O maior valor desse parâmetro foi observado no BB25, porém, não apresentou significância do solo com inserção de bagaço de cana-de-açúcar em combinação com as doses correspondentes a 50 e 100 kg de N ha^{-1} .

Elevados valores de qCO_2 e respiração do solo podem acelerar o processo de degradação da MOS (HU *et al.*, 2016; REY *et al.*, 2011). Fernandes, Bettiol e Cerri (2005) afirmam que a melhoria da qualidade do solo resulta-se da redução dos valores obtidos pelo quociente, de forma que o aumento do qCO_2 pode indicar situação de estresse do solo. Podendo significar que a comunidade microbiana está oxidando carbono intracelular para a sua manutenção e adaptação ao solo, e pode estar em condições estressantes ou adversas (ALVES *et al.*, 2011).

De acordo com Bardgett e Saggar (1994) o qCO_2 vem sendo utilizado como um indicador de estresse microbiano e interpretado como “eficiência microbiana”, por tratar-se de uma medida da energia necessária para manutenção da atividade metabólica em relação à energia para síntese de biomassa. Pode-se dizer que solos com baixas taxas de qCO_2 poderiam indicar economia na utilização de energia podendo estar relacionado a um ambiente mais próximo do seu estado de equilíbrio.

A biomassa microbiana é um indicador sensível das mudanças ocorridas no solo, pois é um dos componentes que controla a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica e, a ciclagem de nutrientes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; REIS JUNIOR; MENDES, 2007; MERCANTE et al., 2008; ALVES et al., 2011).

O Cmic representa a quantidade de carbono que a biomassa microbiana do solo imobiliza em suas células. Kaschuk, Alberton e Hungria (2010) relatam que vários trabalhos têm mostrado que o Cmic é uma variável sensível aos efeitos do manejo do solo. Matsuoka, Mendes e Loureiro (2003) e Cardoso et al. (2009) mencionam que o Cmic representa a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo.

O solo com inserção de BP+BCP, sem ADN, teve maior valor de Cmic – 358,41 mg C kg⁻¹ apresentando significância em relação aos demais tratamentos. E um aumento de 4,77 vezes comparado aos menores valores obtidos nos tratamentos. Elevados valores de Cmic implicam em maior imobilização temporária de nutrientes e, conseqüentemente menor perda dos mesmos no sistema solo-planta (MERCANTE et al., 2004).

O manejo com resíduos orgânicos pode aumentar os teores de carbono e nitrogênio microbiano (GOMES et al., 2001). Foote, Boutton e Scott (2015) relataram aumento da biomassa microbiana após a adição de materiais orgânicos e, estes foram maiores quando combinados com N e P. Vieira, Castilhos e Castilhos (2011) encontraram um aumento significativo nos valores de Cmic do solo após aplicação de lodo, comparados com o tratamento testemunha e tratamento com NPK.

Quanto aos biocarvões, o maior valor foi encontrado no BB+BBC25 – 224,91 mg C kg⁻¹. Liang et al. (2008) também observaram um aumento no Cmic em solo com aplicação de biocarvão, resultando um aumento na eficiência dos microrganismos. Chen et al. (2018) evidenciaram efeitos positivos do biocarvão de lodo sobre a biomassa microbiana de 63,9% a 89,6% em relação ao tratamento controle. Méndez et al. (2016) também notaram maiores valores de Cmic em solo com biocarvão de biossólido como substrato.

De acordo com Gul *et al.* (2015), foram obtidos resultados onde a inserção de biocarvão no solo aumentou o carbono da biomassa microbiana. Giacometti *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (2015) relataram aumento da atividade e biomassa microbiana após aplicações de fertilizantes orgânicos, onde observaram maior atividade quando fertilizantes orgânicos foram combinados com nitrogênio. O Cmic pode ser sensível ao N mineral, porém, varia de acordo com a fonte de nitrogênio, dose, tipo de solo e condição climática (JIA *et al.*, 2020).

Já para os menores teores de Cmic apresentados em alguns tratamentos, como no BB25, pode estar relacionado há uma dinâmica mais lenta da matéria orgânica (MARCHIORI JÚNIOR; MELO, 1999).

O quociente microbiano, parâmetro que representa a relação entre o Cmic e o carbono orgânico total, pode ser utilizado como indicador da qualidade da matéria orgânica do solo. Ele indica a quantidade de carbono orgânico que está imobilizado na biomassa, podendo demonstrar a eficiência dos microrganismos na utilização dos compostos orgânicos. Valores de qMic inferiores a 1% indicam que existe algum fator limitante à atividade microbiana no solo (JAKELAITIS *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2010; DADALTO *et al.*, 2015).

O maior qMic foi no tratamento com mistura de resíduos orgânico e lignocelulósico, onde apresentou um valor de 3,55% evidenciando significância em relação aos demais tratamentos. Um alto quociente microbiano pode indicar uma matéria orgânica muito ativa e sujeita a transformações (SAMPAIO; ARAÚJO; SANTOS, 2008; MATIAS *et al.*, 2009). Apenas solos com adição de BBC25, BCP100, BB25 e BCP50 obtiveram valores inferiores a 1%.

O nitrogênio microbiano apresentou maiores valores nos solos com inserção de BCP100, BP50 e BB+BBC. O maior valor de Nmic pode estar relacionado a inserção de maior dose de fertilizante nitrogenado no solo com bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com Blankenau, Olf e Kuhlmann (2000) e Zaman *et al.* (2002), adições de resíduos orgânicos em conjunto com adubação nitrogenada, aumentaram o Nmic comparado ao tratamento sem a adição de resíduos orgânicos, da mesma forma com que o obtido no presente trabalho.

Alguns trabalhos evidenciaram aumentos do Nmic em resultados de longo prazo em solo sob pastagem e plantio direto (HATCH *et al.*, 2000; VARGAS; SELBACH; SÁ, 2005). Outros autores mencionam que a imobilização de N na biomassa microbiana do solo ocorreu após um ano do início do experimento. Podendo

haver associações entre o aumento do Nmic com a maior fertilidade causada pela adição de nitrogênio e o subsequente retorno dos restos vegetais ao solo (SILVAN *et al.*, 2003; COSER *et al.*, 2007).

A atividade enzimática do solo pode ser considerada um indicador de qualidade do solo, pois controla tanto o fornecimento de nutrientes para as plantas quanto crescimento microbiano (BURNS, 1978; DA SILVA *et al.*, 2012).

A desidrogenase reflete a atividade oxidativa total da microbiota e, não existe extracelularmente no solo, pode atuar como um indicador da atividade microbiana, sendo incitada pela adição de material orgânico no solo (GARCIA; HERNANDEZ; COSTA, 1997; ZHANG *et al.*, 2010; YADA *et al.*, 2015; DELARICA *et al.*, 2016).

Maiores valores da atividade enzimática da desidrogenase foram encontrados em solos com BP+BCP, BCP e BP ambos combinados com a dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ e, no BCP50. E, os menores resultados foram obtidos no solo controle, individual e combinado com fertilizante N e, no BBC. Como observou-se maiores valores em conjunto com adubação nitrogenada, supõe-se que a fertilização mineral com N pode intensificar a atividade dessa enzima.

Araújo, Gil e Tiritan (2009) afirmam que doses de lodo estimularam a atividade enzimática da desidrogenase no solo. Outros autores mencionam que a aplicação de estrume orgânico levou ao aumento da atividade enzimática da desidrogenase, fosfatase ácido e fosfatase alcalina em comparação com o tratamento com fertilizantes químicos (YANG *et al.*, 2020; HEIDARI; MOHAMMADI; SOHRABI, 2016).

A hidrólise de diacetato de fluoresceína avalia a atividade hidrolítica indiscriminada de microrganismos sobre a molécula de FDA, a qual é hidrolisada por algumas enzimas: lipases, proteases e esterases. A medida do grau da hidrólise serve como medida da atividade microbiana total do solo, podendo ser relacionada a quantidade de matéria orgânica (SCHNURER; ROSSWALL, 1982).

Essa enzima pode ser um instrumento eficaz como indicador da qualidade de solos (TYLER, 2020). A atividade desta enzima está relacionada com células metabolicamente ativas na decomposição microbiana e na MOS (BALOTA *et al.*, 2013; GADJA; PRZEWLOKA; GAWRYJOLEK, 2013).

O solo com inserção de biossólido mais bagaço de cana-de-açúcar em combinação com a dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹, apresentou significância em relação a todos tratamentos. E evidenciou um aumento de 8,56 vezes quando comparado ao SC, BB25, BBC50, BBC100, BB+BBC, BB+BBC50 e BB+BBC100.

Elevados valores de FDA podem estar relacionado à alta deposição e transformação de resíduos, fornecendo assim grande fonte de energia para os microrganismos do solo (NYAWADE *et al.*, 2019). Da Silva *et al.* (2015a) registraram maiores valores de FDA em tratamentos que receberam adição sucessiva de dejetos suínos por mais tempo.

Tabela 7 – Respiração ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), C_{mic} (mg kg^{-1}), q_{Mic} (%), q_{CO_2} ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ BMS-C h}^{-1}$), N_{mic} (mg kg^{-1}), desidrogenase ($\mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e FDA ($\mu\text{g FDA g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões

Tratamentos	Doses de N (kg ha^{-1})	Respiração	q_{CO_2}	C_{mic}	q_{Mic}	N_{mic}	Desidrogenase	FDA
SC	0	0,52 e	0,007 c	72,17 g	1,06 d	5,16 e	1,19 d	18,46 g
	25	2,62 e	0,018 c	143,95 e	1,93 c	18,80 b	1,85 d	60,25 e
	50	2,62 e	0,025 c	105,80 f	1,68 d	10,60 d	1,35 d	92,16 d
	100	7,86 d	0,091 b	86,69 f	1,09 d	11,78 d	1,71 d	70,62 e
BP	0	12,06 c	0,063 b	191,74 d	2,10 c	18,22 b	2,67 c	165,06 b
	25	13,05 c	0,064 b	202,82 d	2,33 c	19,98 b	3,38 b	121,53 c
	50	10,83 d	0,053 c	204,57 d	2,31 c	22,64 a	2,62 c	85,97 e
	100	14,50 b	0,075 b	193,64 d	2,17 c	19,16 b	4,30 a	55,53 e
BCP	0	10,40 d	0,074 b	140,15 e	1,15 d	6,24 e	2,50 c	66,94 e
	25	16,62 a	0,062 b	269,45 b	1,91 d	20,52 b	2,31 c	66,02 e
	50	12,12 c	0,221 a	54,92 g	0,44 e	18,14 b	4,00 a	98,19 d
	100	17,99 a	0,232 a	77,70 g	0,60 e	25,38 a	4,50 a	95,41 d
BP+BCP	0	14,84 b	0,041 c	358,41 a	3,55 a	4,35 e	2,93 b	112,07 d
	25	16,56 a	0,114 b	145,59 e	1,37 d	19,41 b	3,31 b	160,54 b
	50	15,31 b	0,064 b	237,80 c	2,70 b	19,44 b	3,61 b	137,13 c
	100	13,59 b	0,088 b	154,54 e	1,81 d	13,39 d	4,72 a	218,08 a

Tabela 7 – Respiração ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), Cmic (mg kg^{-1}), qMic (%), qCO_2 ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ BMS-C h}^{-1}$), Nmic (mg kg^{-1}), desidrogenase ($\mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e FDA ($\mu\text{g FDA g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) em solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões

(conclusão)

Tratamentos	Doses de N (kg ha^{-1})	Respiração	qCO_2	Cmic	qMic	Nmic	Desidrogenase	FDA
BB	0	9,18 d	0,055 c	167,66 e	1,72 d	9,45 d	3,23 b	44,11 f
	25	10,32 d	0,210 a	49,16 g	0,52 e	16,61 c	3,53 b	27,36 g
	50	12,68 c	0,108 b	117,20 e	1,22 d	4,95 e	3,03 b	41,03 f
	100	10,94 d	0,087 b	125,51 e	1,43 d	14,83 c	2,82 c	48,69 e
BBC	0	1,81 e	0,018 c	101,39 f	1,73 d	8,75 d	1,94 d	65,97 e
	25	3,86 e	0,068 b	56,42 g	0,87 e	3,05 e	3,42 b	109,63 d
	50	2,78 e	0,016 c	177,94 d	2,95 b	10,71 d	2,64 c	25,14 g
	100	3,54 e	0,023 c	156,72 e	2,21 c	13,04 d	3,13 b	25,17 g
BB+BBC	0	10,21 d	0,079 b	129,77 e	1,61 d	22,29 a	3,53 b	28,29 g
	25	11,61 c	0,052 c	224,91 c	2,66 b	7,82 e	3,16 b	39,37 f
	50	10,09 d	0,079 b	128,28 e	1,61 d	9,15 d	2,71 c	16,44 g
	100	11,09 d	0,087 b	127,76 e	1,59 d	6,61 e	3,40 b	18,77 g
CV (%)		16,69	31,44	15,03	23,90	16,34	21,78	18,47

Fonte: A autora

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Em relação as avaliações, incluindo apenas solos com adição dos materiais (sem as doses de fertilizantes nitrogenados) (Tabela 7).

Na respiração basal do solo todos os tratamentos, com exceção do BBC apresentaram significância do tratamento controle. Houve um maior valor no BP+BCP e BP. Para o Cmic os maiores resultados também foram no BP+BCP e BP e, todos tratamentos se diferenciaram do solo controle. Indicando que a adição dos materiais orgânicos estimulou a atividade microbiana no solo.

O tratamento com biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar apresentou valor inferior de Cmic, ou seja, ele imobilizou uma menor quantidade de carbono microbiano. O BBC apresentou um alto teor de lignina e, Kuramae *et al.* (2012) mencionam que materiais com elevada concentração de compostos complexos como a lignina é de lenta decomposição. Sugere-se então que ocorreu uma decomposição mais lenta, por possuírem ligações carbônicas mais fortes.

Os menores valores de quociente metabólico foram no BP+BCP, BBC e SC. No qMic os maiores valores foram no BP+BCP e BP apresentando significância em relação aos demais tratamentos. E, o BCP se equiparou ao tratamento controle.

No Nmic os maiores valores foram obtidos no BB+BBC e BP, porém os demais, tiveram significância em relação ao tratamento controle, com exceção do BP+BCP. Quanto as atividades enzimáticas, observou-se que para a desidrogenase o maior valor foi obtido nos tratamentos BB+BBC e BB e, os menores foram no BBC e tratamento controle. Já para o FDA maiores valores foram no BP e BP+BCP.

O BP+BCP foi o tratamento que apresentou maiores valores para respiração basal do solo, Cmic, qMic e FDA. E, menor qCO_2 . Isso pode estar relacionado a uma alta atividade microbiana e imobilização de C, podendo indicar um alto nível de produtividade do ecossistema e melhoria na qualidade do solo. O BP também apresentou maiores valores para respiração, Cmic, Nmic, qMic, quociente metabólico e FDA.

Bueno (2010), Fernandes, Bettiol e Cerri (2005) encontraram maiores valores de respiração, carbono microbiano e quociente metabólico em solos com aplicação de doses crescentes de bio sólido.

- Correlação dos atributos químicos e biológicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas

A Figura 29 mostra a correlação entre os atributos químicos e biológicos do solo.

O carbono da biomassa microbiana teve correlação negativa fraca com fósforo ($r = -0,1$) e acidez potencial ($r = -0,3$). Ou seja, à medida que aumenta acidez potencial e o P no solo há uma redução de C_{mic} . E, apresentou uma baixa correlação positiva com pH, matéria orgânica, saturação por bases, N, Ca e CTC, variando de 0,1 a 0,4.

A respiração apresentou uma baixa correlação negativa com P, K e acidez potencial. Já o q_{Mic} evidenciou baixa correlação negativa com potencial, acidez potencial, teor de sulfato e matéria orgânica, variando de -0,1 a -0,3. No caso da matéria orgânica, altas taxas de respiração indicam uma maior degradação da MOS.

O N_{mic} e o qCO_2 teve uma baixa correlação negativa com K ($r = -0,3$ e $-0,1$).

Quanto as atividades enzimáticas, a desidrogenase apresentou correlação negativa fraca com magnésio, potássio e acidez potencial. Enquanto o FDA, teve uma baixa correlação negativa com o K e acidez potencial.

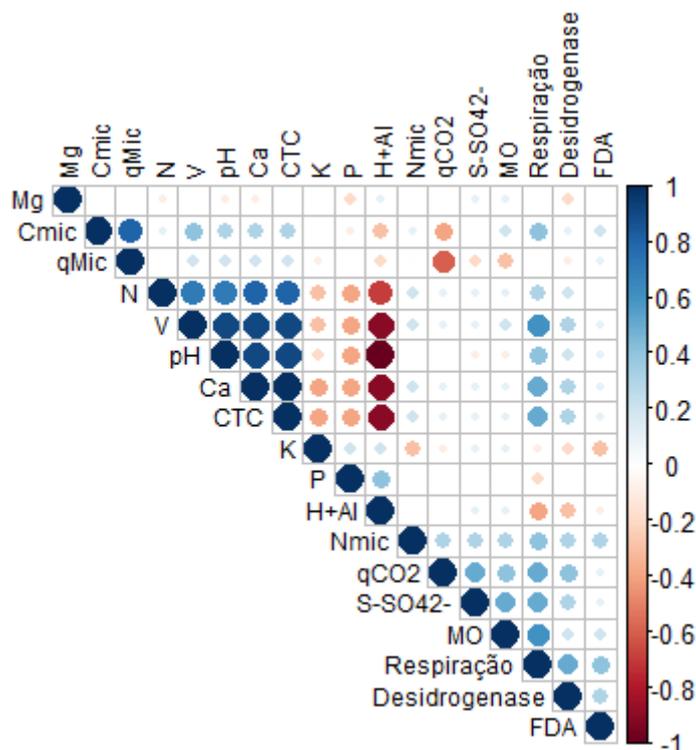
O potássio apresentou baixa correlação negativa com a maioria dos parâmetros microbiológicos. Exceto para o C_{mic} , pois não apresentou significância ($p < 0,05$). Há poucos trabalhos na literatura que correlacionam K com os atributos biológicos do solo, porém sabe-se que a salinidade reduz a atividade dos microrganismos.

O quociente metabólico e o nitrogênio microbiano do solo não apresentaram significância em relação ao pH ($p < 0,05$).

De modo geral a respiração, qCO_2 , C_{mic} , N_{mic} , atividade enzimática da desidrogenase e FDA apresentaram correlação positiva com a matéria orgânica, nitrogênio total, cálcio, capacidade de troca catiônica e saturação por bases.

Porém o q_{Mic} e a FDA não tiveram significância em relação ao N. E, o Mg e P não apresentaram significância para maioria dos atributos biológicos do solo.

Figura 29 – Matriz de correlação de Pearson dos atributos químicos e biológicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões



Fonte: A autora

Legenda: pH: Potencial hidrogeniônico; MO: Matéria orgânica; N: Nitrogênio total; P: Fósforo; S-SO₄²⁻: Teor de sulfato; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; Cores azuis e vermelhas indicam correlações positivas e negativas, respectivamente. Espaços vazios indicam que as correlações não são estatisticamente significativas a $p < 0,05$, teste t.

3.2. Parâmetros de avaliação da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

3.2.1. Produtividade da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

A Tabela 8 apresenta os valores de massa verde e massa seca da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Nos resultados referentes ao primeiro corte, analisando somente os tratamentos na dose zero de adubação nitrogenada, nota-se que o BP apresentou maior valor, seguido pelo BB e BP+BPC, onde ambos apresentaram significância entre si e dos demais tratamentos. E os menores valores de produção de massa verde foram nos tratamentos com inserção de bagaço de cana-de-açúcar, biocarvão de bagaço e no controle. O mesmo ocorreu para a produção de massa seca, porém o tratamento com biocarvão de biossólido e BP+BPC não diferiram.

No segundo corte, na massa verde, o BP obteve maior valor e apresentou significância, isso em relação aos tratamentos sem fertilizante nitrogenado. Observou-se que o BB se equiparou ao BP+BCP. Já a mistura dos biocarvões teve maior valor apenas em relação aos SC, BBC e BCP. Para massa seca os menores valores foram obtidos nas misturas dos biocarvões, no solo controle, no BBC e BCP.

Ainda analisando somente os tratamentos na dose zero de adubação nitrogenada, o BP também evidenciou maiores valores de massa verde e seca no terceiro corte, apresentando significância em relação aos demais. Enquanto os tratamentos com BBC, SC e BCP obtiveram menores valores. Sendo que no tratamento com bagaço de cana-de-açúcar, nesse último corte, não teve como quantificar a produção de massa verde e seca, devido a biomassa da planta ter sido bem reduzida.

Sabe-se que o biossólido é um resíduo rico, principalmente, em nitrogênio e possui em sua composição alguns nutrientes essenciais as plantas. O mesmo por possuir uma relação C/N baixa (7,00) pode indicar uma fácil mineralização do nitrogênio pelos microrganismos do solo. Supõem-se que o N e alguns nutrientes ficaram mais disponíveis no solo e, com isso pode ter ocorrido uma maior absorção de nutrientes pela planta.

No presente estudo, houve maior produção de massa verde e massa seca nos tratamentos com BP. Sendo que o BP, sem ADN, no 1º corte, evidenciou maiores valores de produção da *Urochloa brizantha* cv. Marandu, quando comparado ao tratamento controle (SC) nas doses correspondentes a 25, 50 e 100 kg de N ha⁻¹. Ou seja, só a inserção desse resíduo no solo pode aumentar a produtividade dessa cultura, pois trouxe resultados significativos para produção de massa verde e seca assemelhando com Campos e Alves (2008) que também encontraram uma maior produção de matéria verde e seca da *brachiaria* em tratamentos com inserção de lodo de esgoto.

Da mesma forma, Trannin, Siqueira e Moreira (2005) evidenciaram um aumento significativo analisando a produtividade do milho em solo que recebeu a incorporação de 10 mg ha⁻¹ de lodo de esgoto em base seca, suplementada com K₂O e 30 % da exigência em P₂O₅, equiparando com a produtividade de milho obtida com adubação mineral completa. Para o biocarvão de biossólido, Gwenzi *et al.* (2016) mencionam que sua aplicação ao solo melhora as propriedades de fertilidade e, aumenta o crescimento e produção de biomassa do milho.

Tabela 8 – Valores de massa verde e massa seca da parte aérea do 1°, 2° e 3° corte da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

(continua)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	1°Corte		2°Corte		3°Corte	
		MVPA	MSPA	MVPA	MSPA	MVPA	MSPA
		------(g)-----					
SC	0	5,37 f	2,09 d	7,10 g	1,67 g	21,69 d	17,81 e
	25	16,41 e	5,10 c	26,57 e	5,91 f	42,81 c	23,74 c
	50	19,60 e	5,12 c	40,98 d	9,19 e	60,44 c	29,26 b
	100	41,44 c	10,97 b	67,37 c	16,12 c	88,13 a	34,31 a
BP	0	50,81 b	13,63 a	56,84 c	13,98 d	68,23 b	30,54 b
	25	50,25 b	13,68 a	65,42 c	16,82 c	83,27 b	34,22 a
	50	49,03 b	14,30 a	69,12 c	18,11 c	80,33 b	33,77 a
	100	72,00 a	15,86 a	98,49 a	25,37 a	99,87a	38,79 a
BCP	0	2,39 f	0,71 d	3,92 g	1,02 g	-	-
	25	6,16 f	2,11 d	12,43 f	2,89 g	35,44 d	21,44 d
	50	8,74 f	2,73 d	21,66 f	5,22 f	53,91 c	26,40 c
	100	36,69 c	9,79 b	66,93 c	16,05 c	90,46 a	36,03 a
BP+BCP	0	22,47 e	6,78 c	27,98 e	7,07 f	49,34 c	24,68 c
	25	29,85 d	8,72 c	43,48 d	9,89 e	75,21 b	30,54 b
	50	31,07 d	8,74 c	61,20 c	13,83 d	74,50 b	31,94 b
	100	53,35 b	14,45 a	86,51 b	20,30 b	99,59 a	37,67 a

Tabela 8 – Valores de massa verde e massa seca da parte aérea do 1º, 2º e 3º corte da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

(conclusão)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	1ºCorte		2ºCorte		3ºCorte	
		MVPA	MSPA	MVPA	MSPA	MVPA	MSPA
		-----(g)-----					
BB	0	29,96 d	7,35 c	28,25 e	6,91 f	45,99 c	24,56 c
	25	27,49 d	7,55 c	36,51 d	8,19 e	57,31 c	26,42 c
	50	31,98 d	8,14 c	55,43 c	12,31 d	72,86 b	27,58 b
	100	56,10 b	13,91 a	85,20 b	20,04 b	97,22 a	37,15 a
BBC	0	5,13 f	1,39 d	5,99 g	1,37 g	24,24 d	18,94 d
	25	17,79 e	4,75 c	26,05 e	6,07 f	48,40 c	24,71 c
	50	26,40 d	7,72 c	46,12 d	10,37 e	71,46 b	28,70 b
	100	45,89 b	14,84 a	79,60 b	19,50 b	95,10 a	37,00 a
BB+BBC	0	9,88 f	3,62 d	15,33 f	3,27 g	35,15 d	21,65 d
	25	20,80 e	6,95 c	35,19 d	8,62 e	56,68 c	26,75 c
	50	22,86 e	7,24 c	44,52 d	10,22 e	71,78 b	31,14 b
	100	39,67 c	12,17 b	69,47 c	17,62 c	86,92 a	35,58 a
CV (%)		22,05	26,89	19,03	18,07	13,05	7,33

Fonte: A autora

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. MVPA: Massa verde da parte aérea da planta; MSPA: Massa seca da parte aérea da planta. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Agora, analisando os tratamentos de modo geral, sem e com aplicação das dosagens de adubação mineral 0, 12,5, 25 e 50 mg dm⁻³ correspondente a 0, 25, 50 e 100 kg de N ha⁻¹ (Tabela 8).

Em relação a massa verde, pode-se observar que o tratamento com biossólido na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ apresentou maior valor e significância em relação aos demais tratamentos, isso no 1º e no 2º corte da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Notou-se ainda que houve um aumento significativo da produção de massa verde nesse tratamento, quando compara-se o 1º e 2º, onde no primeiro obteve-se 72 g e no segundo 98,49 g. Já no terceiro corte o BP100 apesar de apresentar maior valor não teve significância em relação ao BP+BCP100, BB100, BBC100, BCP100, SC100 e BB+BBC100.

No 1º corte observa-se que os tratamentos que antes não havia aumento da produtividade, como o SC, BBC e o BP, após a adição da ADN na dose de 50 mg dm⁻³ correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ passaram a ter valores de produção de massa verde mais próximos aos encontrados no tratamento somente com adição de biossólido. Enquanto no 2º e 3º corte esses tratamentos ultrapassam os valores de produção de massa verde presentes no tratamento com inserção de biossólido sem adição de uréia.

De maneira geral, os tratamentos BP100, BP+BCP100 e BB100 apresentaram maiores valores nos três cortes da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Enquanto os menores valores para produção de massa verde da parte aérea para o primeiro corte foram encontrados no BB+BBC, BCP50, BCP25, SC, BBC e BCP. Já no 2º corte foram os tratamentos SC, BBC e BCP e, no 3º corte foi o SC e o BCP.

No presente estudo quando houve a aplicação da dose de 50 mg dm⁻³ de adubação mineral, notou-se um aumento significativo em relação aos tratamentos com a inserção de biossólido e seu respectivo biocarvão, que antes da inserção das doses de ADN já evidenciaram maiores valores que o tratamento controle sem ADN. O BP100 apresentou um aumento na produção de massa verde, no primeiro corte, de 10,46 vezes e, no segundo corte de 16,37 em relação aos tratamentos que obtiveram os menores valores.

Há uma maior resposta das culturas quando ocorre aplicação conjunta de biocarvão com adubo nitrogenado (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013). Isso foi observado nos tratamentos que tinham biocarvões em conjunto com ADN, pois apresentaram aumento na produção de massa verde, principalmente o BB100.

O biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar, com dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹, nos resultados do primeiro e segundo corte obtiveram valores superiores ao SC100.

Na Figura 30, de maneira geral, verificou-se que houve significância estatística ($p < 0,01$ e $p < 0,05$) da produtividade em função das doses de N. Onde a adubação nitrogenada provocou um aumento na produção de massa seca, principalmente na dose de 50 mg dm⁻³.

Comparando os valores da produtividade em função das doses de adubação nitrogenada nota-se que no terceiro corte houve uma maior produtividade em relação ao 1° e 2° corte.

As Figuras 30B, 30P, 30Q e 30R apresentaram uma maior linearidade ($R^2 = 0,99$) e evidenciaram significância ($p < 0,01$) da produtividade em função das doses de adubação nitrogenada.

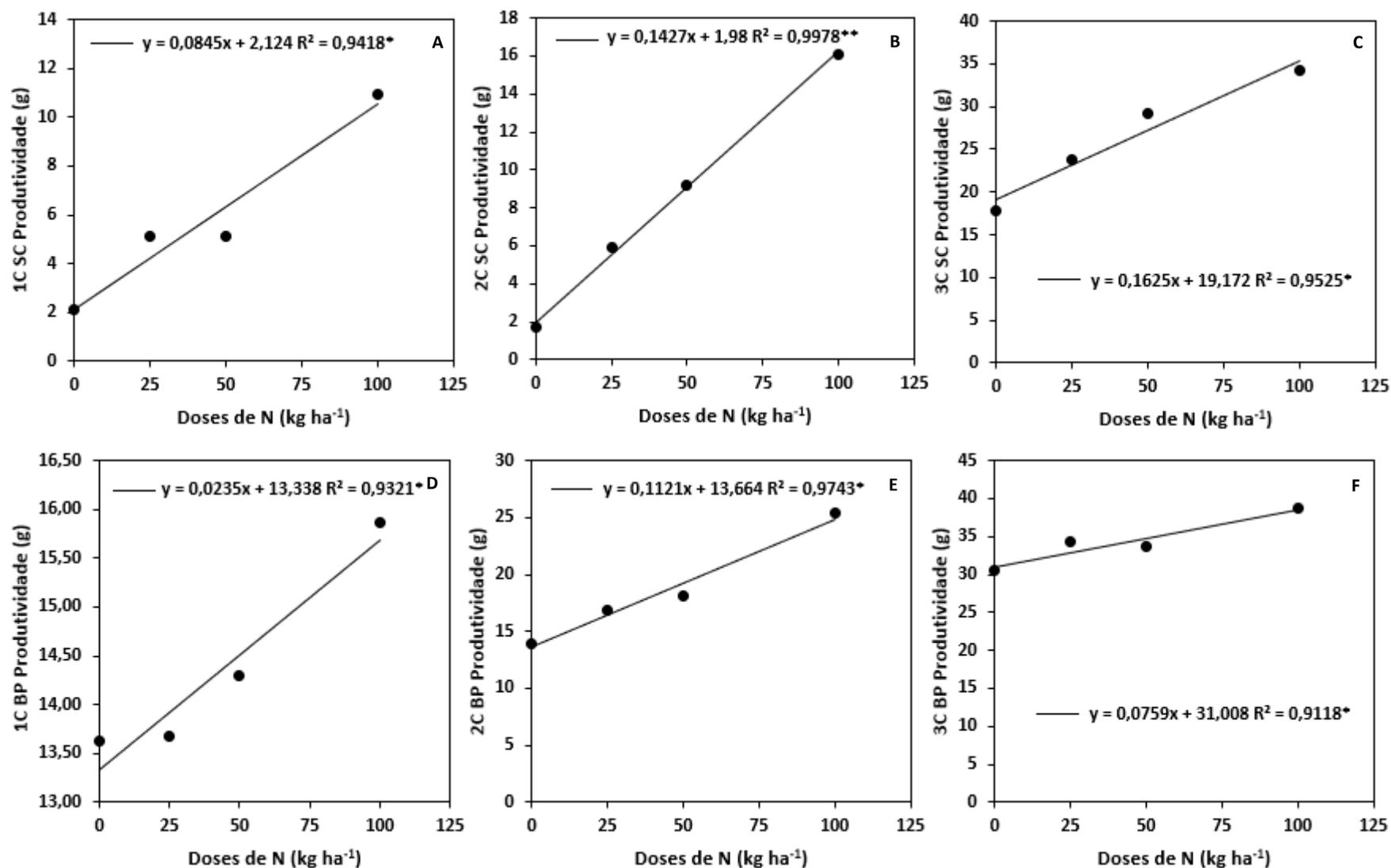
O tratamento com inserção de biossólido evidenciou maiores valores, em ambos os cortes ($p < 0,05$), de produtividade na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ (Figura 30D, 30E e 30F). Araujo, Gil e Tiritan (2009) constataram maior produção de massa seca foliar em função da aplicação de lodo de esgoto.

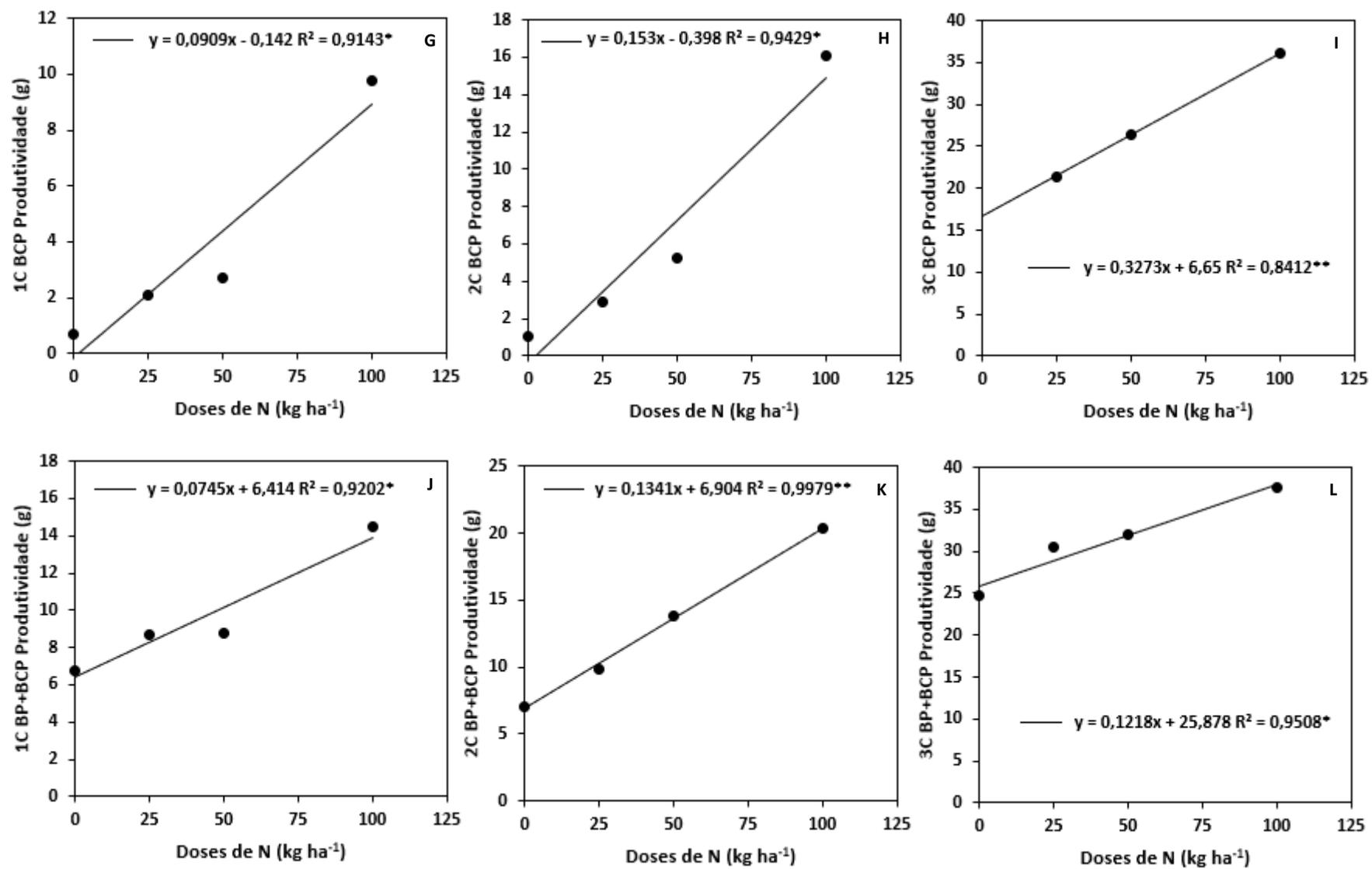
O mesmo foi observado para o tratamentos com biocarvão de biossólido (Figura 30M, 30N e 30O), porém no 1° corte não teve significância, já no 2 e 3° corte apresentou significância de 5%. Albuquerque *et al.* (2014), Rosa *et al.* (2014) e Hossain *et al.* (2010) encontraram efeitos positivos na produção de massa seca das plantas em função da aplicação de biocarvão, corroborando com o presente trabalho.

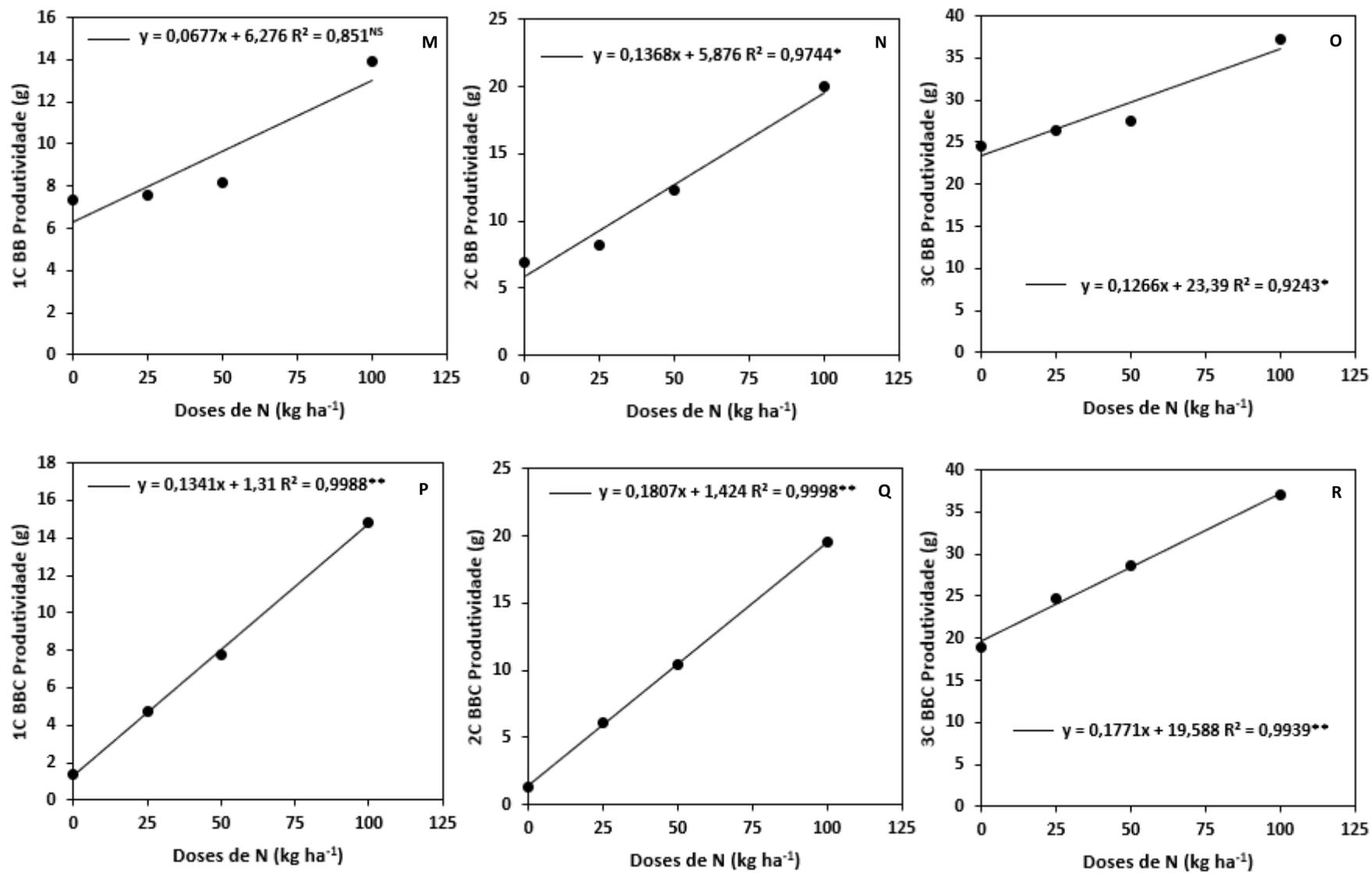
O BP+BCP (Figuras 30J, 30K e 30L) e o BBC (Figuras 30P, 30Q e 30R) também evidenciaram maior produtividade em decorrência da maior dose de ADN. Há um acréscimo da produção de massa seca em função da doses de N (SANTOS *et al.*, 2013). Hurtado *et al.* (2010) em seu estudo em diferentes solos, evidenciaram resultados crescentes para massa seca foliar com doses de nitrogênio, como obtido no presente estudo.

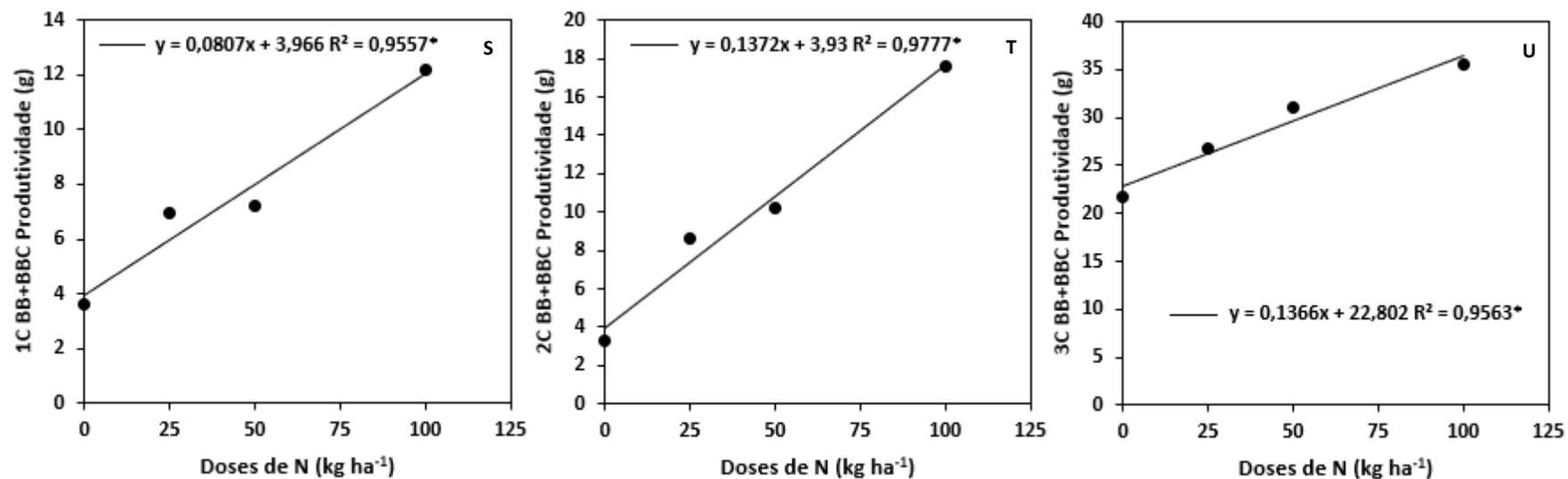
Outro fator que deve ser considerado em relação a produção de massa da planta no 1°, 2° e 3° corte pode também estar relacionada a fatores fitotécnicos, climáticos e temporais.

Figura 30 – Gráfico de regressão linear da produtividade do 1,2 e 3 corte em função da adubação nitrogenada nos tratamentos









Fonte: A autora.

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. ** e * significativo a 1% e a 5 %, respectivamente, pelo teste t.

Relacionando a produção de massa seca com a quantidade de nutrientes, como o P, K (Tabela 4), NH_4^+ e NO_3^- (Tabela 6) presentes no solo após o plantio, nota-se que o solo com inserção de bagaço de cana-de-açúcar e seu respectivo biocarvão, ambos sem ADN, tiveram menores valores, juntamente com o tratamento controle, de produtividade da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Porém, quando se analisa o solo, observa-se que o teor de fósforo e potássio foram maiores nesses tratamentos. Dessa forma, supõem-se que a planta teve uma maior dificuldade em absorver os nutrientes, o que pode ter afetado o crescimento e a produção de massa foliar, ocasionando uma maior reserva desses nutrientes no solo.

Enquanto, o BP100 que teve maior produção de massa em todos os cortes apresentou menores valores de P e K no solo, em comparação aos tratamentos que tiveram menores resultados de produtividade. Isso pode ter ocorrido devido a um maior aporte de nutriente, via decomposição do bio sólido e via adubação nitrogenada, pela planta.

Já em relação ao amônio e nitrato na profundidade de 0-5 cm do solo, observou-se que o bio sólido na dose máxima de ADN obteve menores teores desses elementos em comparação com o BCP. Supõem-se que pode ter ocorrido uma maior absorção desses elementos pela planta, no tratamento com BP100 e, em decorrência houve uma maior produção de massa foliar. Visto que, as forrageiras são excelentes extratoras de nitrogênio do solo (PRIMAVESI *et al.*, 2001; CANTARELLA *et al.*, 2003; COSTA *et al.*, 2008), preferencialmente na forma de NH_4^+ e NO_3^- .

A Tabela 9 apresenta os valores de massa seca da parte radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Os maiores valores de massa seca radicular foram encontrados nos tratamentos com bio sólido nas doses correspondente a 50 e 100 kg de N ha^{-1} . Porém não apresentaram significância em relação ao BP, BP25, SC25, SC50, SC100, BCP100, BP+BCP50, BP+BCP100, BB100, BBC25, BBC50, BBC100 e BB+BBC100. Já os menores valores foram obtidos no BCP, SC, BBC e BB, sem ADN.

Salton e Tomazi (2014) mencionam que as raízes liberam constantemente exsudados que promovem maior atividade dos microrganismos e funcionam como agente agregador das partículas do solo, para formação dos agregados.

Um sistema radicular bem desenvolvido garante boa formação e sustentação da parte aérea, de modo que uma planta bem suprida em nitrogênio apresenta sistema

radicular maior que uma planta deficiente em N (BROWER, 1962; BATISTA; MONTEIRO, 2006).

O fósforo também pode estimular o desenvolvimento radicular, pois plantas bem supridas em P podem desenvolver mais raízes que plantas com deficiência desse elemento (RAIJ, 1991; GARDNER; PEARCE; MITCHELL, 1985; ROSSI; MONTEIRO, 1999; FERNANDES; BRACHTVOGEL; DOS REIS, 2019).

Tabela 9 – Valores de massa seca da parte radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	Massa seca da parte radicular
		(g)
SC	0	3,69 c
	25	15,47 a
	50	17,53 a
	100	17,82 a
BP	0	16,99 a
	25	17,12 a
	50	23,55 a
	100	23,45 a
BCP	0	2,84 c
	25	11,19 b
	50	10,40 b
	100	17,33 a
BP+BCP	0	11,36 b
	25	12,84 b
	50	18,00 a
	100	18,47 a
BB	0	6,46 c
	25	8,11 b
	50	11,83 b
	100	15,17 a
BBC	0	4,46 c
	25	20,52 a
	50	16,52 a
	100	16,46 a
BB+BBC	0	9,03 b
	25	11,18 b
	50	12,06 b
	100	13,80 a
CV (%)		30,78

Fonte: A autora.

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BCP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (p<0,05).

- Correlação da produtividade da *brachiaria* e atributos químicos e biológicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões sob doses de adubações nitrogenadas

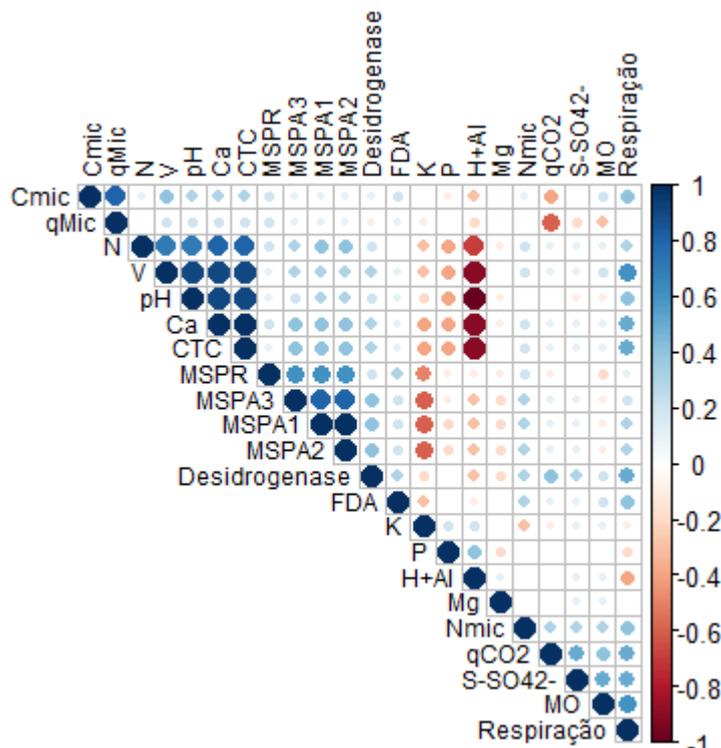
A Figura 31 evidencia uma baixa correlação positiva, da produção de massa seca foliar do 1º, 2º e 3º corte com os atributos biológicos. Já para os atributos de fertilidade do solo houve correlação positiva com o N-total, V, pH, Ca, teor de sulfato e CTC, ambos variando de 0,1 a 0,4.

Para o 1º, 2º e 3º corte a produção de massa seca foliar apresentou correlação negativa com matéria orgânica ($r = -0,1$), acidez potencial ($r = -0,3$), P ($r = -0,2$ e $-0,1$), K ($r = -0,6$) e Mg ($r = -0,2$).

A produção de massa seca radicular apresentou baixa correlação positiva com os atributos biológicos do solo, exceto para o qCO_2 ($r = -0,1$). Este parâmetro evidenciou ainda uma correlação negativa com a matéria orgânica ($r = -0,2$), acidez potencial, P, Mg ($r = -0,1$) e K ($r = -0,5$).

Nos atributos químicos do solo observa-se maiores valores de potássio em solo com inserção de BCP25, BCP e BBC. Sendo que esses tratamentos foram os que tiveram menores valores de produtividade em todos os cortes. Podendo significar que a planta teve uma maior dificuldade em absorver esse nutriente do solo. Visto que, a massa seca foliar e radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu apresentaram correlação negativa com o K.

Figura 31 – Matriz de correlação de Pearson da produtividade da *Urochloa brizantha* cv. Marandu e atributos químicos e biológicos de solo com inserção de resíduos orgânicos e biocarvões



Fonte: A autora

Legenda: pH: Potencial hidrogeniônico; MO: Matéria orgânica; N: Nitrogênio total; P: Fósforo; S-SO₄²⁻: Teor de sulfato; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; MSPA1: Massa seca da parte aérea 1° corte; MSPA2: Massa seca da parte aérea 2° corte; MSPA3: Massa seca da parte aérea 3° corte; MSPR: Massa seca da parte radicular. Cores azuis e vermelhas indicam correlações positivas e negativas, respectivamente. Espaços vazios indicam que as correlações não são estatisticamente significativas a $p < 0,05$, teste t.

3.2.2. Diagnose foliar

Embora não tenha sido quantificado os perfilhos da planta, observou-se que o solo que tinha apenas inserção de bagaço de cana-de-açúcar e seu respectivo biocarvão, ambos na dose 0 de ADN em comparação aos demais tratamentos apresentou menores quantidades de perfilhos. Alguns autores relatam e destacam em seus estudos o efeito positivo do nitrogênio sobre o perfilhamento (ALEXANDRINO *et al.*, 2004, MARTUSCELLO *et al.*, 2005; ALEXANDRINO, VAZ; SANTOS, 2010).

A Tabela 10 apresenta os valores de carbono, nitrogênio e relação C/N foliar da *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

No primeiro corte os tratamentos com inserção de BP100, BP50 e BP25 apresentaram maiores valores de nitrogênio total foliar tendo significância em relação

aos demais tratamentos. Já o SC, SC25, BBC25 e BBC50 obtiveram menores teores. Quanto aos resultados de carbono orgânico absorvido pela planta não houve significância estatística, porém notou-se maiores valores no tratamento com adição somente de bagaço de cana-de-açúcar e um menor valor no BP100. A maior relação C/N foi encontrada no tratamento controle sem ADN, que teve significância em relação aos demais, isso ocorreu possivelmente devido a menor absorção de N e maior de carbono.

Já no segundo corte o maior teor de N foliar foi no tratamento com BP+BPC100, porém não houve significância em relação ao BB100, BB+BBC25, BP100, BB+BBC50, BB+BBC100, BP+BPC50 e BB+BBC. E, os menores valores foram no tratamento com BCP, BCP25, SC e SC25. Para os valores de carbono orgânico quando se compara ao 1º corte os valores do BP foram de 99,82 para 116,94 g kg⁻¹ e, já o BCP foi de 232,36 a 114,90 g kg⁻¹. A maior relação C/N foi no tratamento BCP sem ADN, que teve significância em relação aos demais tratamentos estudados.

No 3º corte o maior valor de N foliar foi observado no BP+BPC100, mas não teve significância em relação ao BP100, BB+BBC100, BP50 e BB100. Já o maior valor de carbono orgânico foliar foi encontrado no BBC, sem ADN, porém não diferiu do SC, BCP25, BB+BBC e SC25. Maiores valores de relação C/N foram observados no BBC e SC sem adubação nitrogenada, que tiveram significância em relação aos demais tratamentos. E os menores valores foram no BP+BPC100 e BP100.

Malavolta (2006) menciona que o nitrogênio absorvido pela planta na forma altamente oxidada encontra-se na forma reduzida, NH₃ ou NH₄⁺ nos compostos orgânicos celulares. Representados pelos aminoácidos que são componentes da cadeia proteica, por exemplo.

Um fato muito interessante de se observar, ocorreu nos valores de N foliar do 2º corte, onde os tratamentos que tinham biocarvões, de maneira geral, apresentaram um aumento de N foliar e redução de carbono orgânico, comparados ao 1º e 3º corte.

Comparando os valores do 1º e 2º corte, nota-se que no 2º os tratamentos com resíduos orgânicos tiveram redução tanto de carbono como de nitrogênio foliar, com exceção apenas dos tratamentos BP+BPC50 e BP+BPC100 que apresentaram um aumento do N foliar, assim como os tratamentos controles nas doses: 0, 25 e 50 kg de N ha⁻¹. Já no 3º corte ocorreu um aumento em todos os tratamentos nos teores de carbono orgânico e redução do N foliar.

A Tabela 11 apresenta os valores de carbono, nitrogênio e relação C/N radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu, onde evidenciou maior valor de nitrogênio radicular no tratamento com BP100, porém não teve significância em relação ao BP50, BP+BCP100, BP+BCP50, BP+BCP e BP+BCP25. Os maiores valores de carbono orgânico e relação C/N foram nos tratamentos SC, SC50, SC25 que apresentaram significância em relação aos demais tratamentos. E, o BB também obteve um maior valor de carbono orgânico.

De maneira geral, comparando os valores de produção de massa seca foliar com a quantidade de N foliar, observa-se que os tratamentos que obtiveram maiores valores de massa seca foliar nos cortes, como por exemplo o BP100 e o BP+BCP100, estão entre os tratamentos que evidenciaram maiores teor de N foliar. E, quanto a parte radicular, os tratamentos que apresentaram maiores valores de massa seca, obtiveram maiores resultados de nitrogênio radicular.

Tabela 10 – Valores de carbono orgânico total, nitrogênio total e relação C/N do 1°, 2° e 3° corte da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

(continua)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	1°Corte			2°Corte			3°Corte		
		COTPA	NTPA	C/N	COTPA	NTPA	C/N	COTPA	NTPA	C/N
		----- (g kg ⁻¹) -----			----- (g kg ⁻¹) -----			----- (g kg ⁻¹) -----		
SC	0	195,62 a	6,42 d	30,47 a	95,04 b	12,22 e	7,78 b	386,60 a	10,30 c	37,53 a
	25	149,88 a	8,00 d	18,74 b	90,84 b	12,02 e	7,56 b	278,42 a	11,28 c	24,68 b
	50	128,46 a	12,72 c	10,10 c	98,84 b	13,30 d	7,43 b	237,62 b	11,86 c	20,04 b
	100	135,58 a	18,08 b	7,50 c	108,12 a	15,82 c	6,83 b	194,90 c	10,38 c	18,78 c
BP	0	132,04 a	18,60 b	7,10 c	108,40 a	14,30 c	7,58 b	221,14 c	13,90 b	15,91 c
	25	129,06 a	21,70 a	5,95 c	116,22 a	15,66 c	7,42 b	191,86 c	13,92 b	13,78 c
	50	130,72 a	24,06 a	5,43 c	117,56 a	16,96 b	6,93 b	207,78 c	16,96 a	12,25 c
	100	99,82 a	24,42 a	4,09 c	116,94 a	20,00 a	5,85 c	185,96 c	18,96 a	9,81 c
BCP	0	232,36 a	19,86 b	11,70 c	114,90 a	11,7 e	9,82 a	-	-	-
	25	182,24 a	15,72 b	11,59 c	96,30 b	12,64 e	7,62 b	303,04 a	13,16 b	23,03 b
	50	157,08 a	19,34 b	8,12 c	100,76 b	14,22 c	7,09 b	234,08 b	10,32 c	22,68 b
	100	135,48 a	16,18 b	8,37 c	103,74 b	14,48 c	7,16 b	194,64 c	12,30 c	15,82 c
BP+BCP	0	150,36 a	18,82 b	7,99 c	109,44 a	14,38 c	7,61 b	249,26 b	14,30 b	17,43 c
	25	151,20 a	14,50 b	10,43 c	95,98 b	14,42 c	6,66 b	192,90 c	13,50 b	14,29 c
	50	132,74 a	13,00 c	10,21 c	109,34 a	19,02 a	5,75 c	187,84 c	15,02 b	12,51 c
	100	185,62 a	17,00 b	10,92 c	118,56 a	22,06 a	5,37 c	172,14 c	19,38 a	8,88 c

Tabela 10 – Valores de carbono orgânico total, nitrogênio total e relação C/N do 1º, 2º e 3º corte da *Urochloa brizantha* cv. Marandu
(conclusão)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	1ºCorte			2ºCorte			3ºCorte		
		COTPA	NTPA	C/N	COTPA	NTPA	C/N	COTPA	NTPA	C/N
		----- (g kg ⁻¹) -----			----- (g kg ⁻¹) -----			----- (g kg ⁻¹) -----		
BB	0	116,16 a	13,30 c	8,73 c	112,60 a	16,62 b	6,77 b	236,40 b	12,48 c	18,94 b
	25	126,20 a	12,18 c	10,36 c	109,52 a	17,04 b	6,43 c	206,62 c	13,64 b	15,15 c
	50	119,02 a	16,04 b	7,42 c	109,68 a	18,40 b	5,96 c	166,42 c	13,76 b	12,09 c
	100	119,54 a	17,40 b	6,87 c	114,24 a	21,34 a	5,35 c	179,12 c	16,54 a	10,83 c
BBC	0	144,26 a	11,90 c	12,12 c	116,08 a	15,54 c	7,47 b	352,24 a	11,32 c	31,12 a
	25	146,92 a	8,88 d	16,55 c	110,04 a	14,22 c	7,74 b	208,88 c	10,26 c	20,36 b
	50	127,86 a	9,24 d	13,84 c	110,16 a	16,00 c	6,89 b	175,26 c	11,46 c	15,29 c
	100	146,74 a	12,74 c	11,52 c	112,58 a	18,04 b	6,24 c	179,46 c	15,14 b	11,85 c
BB+BBC	0	166,90 a	10,44 c	15,99 c	103,12 b	19,00 a	5,43 c	287,64 a	13,14 b	21,89 b
	25	150,18 a	9,12 c	16,47 c	113,14 a	20,54 a	5,51 c	194,56 c	11,96 c	16,27 c
	50	144,34 a	10,84 c	13,32 c	109,70 a	19,68 a	5,57 c	208,06 c	13,10 b	15,88 c
	100	144,42 a	18,78 b	7,69 c	130,00 a	19,64 a	6,62 c	191,42 c	18,52 a	10,34 c
CV (%)		22,67	16,93	40,64	9,57	8,55	13,69	9,72	12,52	19,85

Fonte: A autora

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BSP: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. COTPA: Carbono orgânico da parte aérea da planta; NTPA: Nitrogênio total da parte aérea da planta; Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Tabela 11 – Valores de carbono orgânico total, nitrogênio total e relação C/N da parte radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

(continua)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	Raiz		
		COT	NT	C/N
		----- (g kg ⁻¹) -----		
SC	0	255,22 a	5,40 b	47,26 a
	25	196,82 a	3,68 d	53,48 a
	50	199,06 a	4,26 c	46,73 a
	100	101,48 c	5,10 c	19,90 c
BP	0	109,20 c	5,36 b	20,37 c
	25	104,42 c	5,76 b	18,13 c
	50	77,56 c	7,16 a	10,83 c
	100	51,54 c	7,36 a	7,00 c
BCP	0	60,06 c	5,04 c	11,92 c
	25	142,54 b	4,68 c	30,46 b
	50	91,20 c	4,90 c	18,61 c
	100	40,42 c	3,66 d	11,04 c
BP+BCP	0	121,76 c	6,56 a	18,56 c
	25	44,18 c	6,46 a	6,84 c
	50	39,30 c	6,90 a	5,70 c
	100	49,72 c	6,96 a	7,14 c

Tabela 11 – Valores de carbono orgânico total, nitrogênio total e relação C/N da parte radicular da *Urochloa brizantha* cv. Marandu

(conclusão)

Tratamentos	Doses de N (kg ha ⁻¹)	Raiz		
		COT	NT	C/N
----- (g kg ⁻¹) -----				
BB	0	195,46 a	5,82 b	33,58 b
	25	77,34 c	4,00 d	19,34 c
	50	97,16 c	5,18 c	18,76 c
	100	60,02	5,56 b	10,79 c
BBC	0	91,00 c	4,56 c	19,96 c
	25	148,76 b	4,58 c	32,48 b
	50	75,68 c	3,20 d	23,65 c
	100	51,28 c	3,98 d	12,88 c
BB+BBC	0	73,60 c	4,38 c	16,80 c
	25	93,02 c	4,66 c	19,96 c
	50	65,3 c	4,66 c	14,01 c
	100	97,46 c	5,60 b	17,40 c
CV (%)		41,30	15,13	44,28

Fonte: A autora

Legenda: SC: Solo controle; BP: Biossólido; BCP: Bagaço de cana-de-açúcar; BP+BPC: Biossólido + Bagaço de cana-de-açúcar; BB: Biocarvão de Biossólido; BBC: Biocarvão de Bagaço de cana-de-açúcar. BB+BBC: Biocarvão de Biossólido + Biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

4. CONCLUSÃO

Mediante os resultados já discutidos, o presente trabalho possibilitou as seguintes conclusões:

1. O bio sólido na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹ apresentou maior valor de produção de massa seca em todos os cortes e, evidenciou maiores teores de nitrogênio foliar e radicular;
2. O bagaço de cana-de-açúcar, sem adubação nitrogenada, não evidenciou efeitos positivos para produtividade da *brizantha* cv. Marandu se equiparando ao solo controle;
3. A incorporação de BP, BB, BP+BCP e BB+BBC no solo, individuais ou combinados com ADN, proporcionou um aumento no pH, Ca, CTC e V;
4. O bio sólido e seu respectivo biocarvão podem agir como corretivos de solos, proporcionando o efeito da calagem com calcário;
5. Tratamentos apenas com bagaço de cana-de-açúcar, individuais ou combinados, apresentaram maiores teores de matéria orgânica e carbono no solo;
6. Nos tratamentos havia maior teor de nitrogênio orgânico e menores valores de amônio e nitrato no solo;
7. A atividade da biomassa microbiana do solo teve alterações com adição de resíduos e biocarvões e, as atividades enzimáticas da desidrogenase e FDA obtiveram maiores valores no solo com adição de BP+BCP na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se, de modo geral, que a aplicabilidade de resíduos no solo é uma prática viável, pois além de proporcionar uma sustentabilidade, por estar dando um destino mais viável e vantajoso para gestão de resíduos, sua aplicação no solo apresentou efeitos positivos em relação a produtividade da *brizantha* cv. Marandu e aos atributos do solo.

O biossólido é um resíduo que normalmente é acomodado em grandes áreas na própria ETE ou em aterros sanitários, o que demanda custos e inutilização de grandes áreas. E esse estudo contribuiu para comprovar que o biossólido puro ou pirolisado a 350°C tem um grande potencial para ser utilizado como condicionador de solos, pois é um resíduo que quando aplicado ao solo pode agir como um corretor da acidez, visto que trouxe melhoria aos atributos de fertilidade do solo e, influenciou de forma positiva na produtividade da *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A inserção do biossólido e do biocarvão de biossólido propiciou também um aumento do teor de nitrogênio total no solo. Ou seja, o aproveitamento desse resíduo como condicionador seria uma forma de reduzir a ocupação de grandes áreas, minimizar gastos relacionados ao acondicionamento desse resíduo e, sua aplicabilidade no solo possibilitaria uma melhoria de solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente. Pois obteve-se resultados positivos em relação aos atributos de fertilidade do solo num curto período de tempo (aproximadamente 10 meses).

Quanto ao bagaço de cana-de-açúcar, o presente estudo evidenciou que esse resíduo apresenta um potencial para o reaproveitamento no solo, pois apesar de não apresentar, quando comparado ao biossólido e seu biocarvão, efeitos muito significantes em relação aos atributos químicos do solo, onde havia inserção de bagaço de cana-de-açúcar houve um incremento no teor de matéria orgânica e carbono orgânico no solo, comparado aos demais tratamentos. Outra evidencia importante foi que a mistura de BP+BCP em conjunto com a ADN na dose correspondente a 100 kg de N ha⁻¹, trouxe maiores valores para as atividades enzimáticas da desidrogenase e FDA.

Nesse contexto, a contribuição da pesquisa para a região do Oeste Paulista seria uma oportunidade de aproveitamento de resíduos, como o biossólido e o bagaço de cana-de-açúcar, no solo como condicionador. Pois, como a região é caracterizada por solos arenosos que apresentam limitações como: baixa fertilidade natural, acidez

elevada e baixo teor de matéria orgânica, seria uma forma de aplicar esses resíduos no solo, dando um novo destino por meio da reciclagem agrícola, de maneira que isso possa representar ganhos econômicos, sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A. *et al.* Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, v. 177, p. 16–25, oct/2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jpln.201200652> Acesso em: 30 nov. 2021.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, p.576, 1995.

ALEXANDRINO, E.; VAZ, R. G. M. V.; SANTOS, A. C. Características da *brachiaria brizantha* cv. Marandu durante o seu estabelecimento submetida a diferentes doses de nitrogênio. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 26, p. 886-893, 2010.

ALEXANDRINO, E.; JÚNIOR, D. N.; MOSQUIN, P. R.; REGAZZI, A. J.; ROCHA, F. C. Características morfogênicas e estruturais na rebrotação da *brachiaria brizantha* cv. Marandu submetida a três doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1372-1379, 2004.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 105f. Tese (Doutorado) - ESALQ/USP, Piracicaba, 2008.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.25, p.393-395, mar/1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071793901407> Acesso em: 30 nov. 2021.

ALLISON, S. D.; WALLENSTEIN, M.D.; BRADFORD, M.A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology. **Nat. Geosci.**, 3 (5) , p. 336-340, apr/2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo846>. Acesso em: 30 nov. 2021.

ALVES, B. S. Q. *et al.* Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, v. 31, p.572-582, 2021.

ALVES, T. S. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta. Scientiarum Agronomy**, Maringá v. 33, p. 341-347, 2011.

ARAUJO, F. F.; GIL, F. C.; TIRITAN, C. S. Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de brachiaria decumbens e na atividade da desidrogenase. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 1, p. 1-6, jan./mar 2009. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/3319>. Acesso em: 29 nov. 2021

ARAUJO, T. S. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo cultivado com milho consorciado com leguminosas de cobertura. **Revista de Ciências Agrárias**, v.42, 2019. Disponível em: <https://scielo.pt/pdf/rca/v42n2/v42n2a06.pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

BACKES, C. *et al.* Efeito do lodo de esgoto e nitrogênio na nutrição e desenvolvimento inicial da mamoneira. **Biosci. J.** Uberlândia, v.25 p.90-98, 2009.

BALOTA, E. L. *et al.* Enzimas e seu papel na qualidade do solo. *In:* ARAUJO, A. P.; ALVES, B. J. R. Tópicos em ciência dos solos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, p.189-250, 2013.

BARDGETT, G.D.; SAGGAR, S. Effect of heavy metal contamination on the short-term decomposition of labeled [¹⁴C] glucose in a pasture soil. *Soil Biology and Biochemistry*, v.26, p. 727-733, jun/1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071794902658> Acesso em: 30 nov. 2021

BARROS, I. T. *et al.* Avaliação agrônômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, mar/2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/MxYQLSBb9c6g6CSYjrKRrJG/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 30 nov. 2021

BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Sistema radicular do capim-Marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre (1). *Rev. Bras. Ci. Solo*, 30, n.5, out/2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/rtwWhL3nb4MVbHFNq7bGyJb/> Acesso em: 30 nov. 2021

BIEDERMAN, L. A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **Global Change Biology Bioenergy**, v.5, p.202-214, dec/2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12037>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BLANKENAU, K.; OLFS, H.-W.; KUHLMANN, H. Effect of microbial nitrogen immobilization during the growth period on the availability of nitrogen fertilizer for winter cereals. **Biology and Fertility of Soils**, v.32, p.157-165, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs003740000230> Acesso em: 30 nov. 2021

BRASIL. Resolução CONAMA nº 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 União**, Brasília, Distrito Federal, ago/2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BROWER, R. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. *Nether. J. Agric. Sci.*, v.10, p.342-399, 1962.

BOLAT, I.; ÖZTÜRK, M. Effects of altitudinal gradients on leaf area index, soil microbial biomass C and microbial activity in a temperate mixed forest ecosystem of Northwestern Turkey. **IForest Biogeosciences and Forestry**, v.10, p. 334-340, jul/2016. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/pdf/?id=ifor1974-009> Acesso em: 30 nov. 2021

BORGES, B. M. M. N. *et al.* Re-use of sugarcane residue as a novel biochar fertiliser - Increased phosphorus use efficiency and plant yield. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, jul/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620314530> Acesso em: 30 nov. 2021

BUENO, J. R. P. **Qualidade do solo após sucessivas aplicações de lodo de esgoto para o cultivo do milho**. 2010. Dissertação (Mestrado). Instituto Agrônomo Campinas-SP, Campinas, 2010.

BURNS, R. G. (Ed.) **Soil Enzymes**. London: Academic Press, 1978.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso do lodo de esgoto na reestruturação do solo degradado. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p.1389-1397, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/hYRf5yBpRX4qkCZYBLwH4dg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Determinação de nitrogênio total em solo e determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. *In*: RAIJ, B. Van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001.

CANTARELLA, H. *et al.* Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. *Nutr. Cycling Agroec.*, v.67, p. 215-223, 2003. Disponível em: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/648884> Acesso em: 30 nov. 2021

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 2016.

CARDOSO, E. L. *et al.* Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.631-637, jun/2009. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/pab/a/WfgswvqgXkBq538ZKGFhszB/?format=pdf&lang=pt>
Acesso em: 30 nov. 2021

CAYUELA, M. L. et al. Biochar and denitrification in soils: When, how Much and why does biochar reduce N₂O emissions? **Scientific Reports** v.3, apr/2013. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep01732> Acesso em: 30/11/2021

CELY, P. et al. A. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. **Journal Analytical Applied Pyrolysis**. v.111, p. 173-182, jan/2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237014003404> Acesso em: 30 nov. 2021

CHENG, Y. et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated Black Chernozem. *Biology and Fertility of Soils*, 48, p. 941-946, apr/2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-012-0687-0> Acesso em: 30 nov. 2021

CHEN, H. et al. Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 333–342, sep/2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718312804> Acesso em: 30 nov. 2021

CHEN, L. F. et al. Empirical evidence for microbial regulation of soil respiration in alpine forests. *Ecological Indicators*, v.126, jul/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21003757?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021

CLOUGH, T. J.; CONDRON, L. M. Biochar and the nitrogen cycle: introduction. **J. Environ. Qual.**, v.39, p. 1218-1223, jul/2010. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2010.0204> Acesso em: 30 nov. 2021

COSER, T. R. et al. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo de cerrado com aplicação de fertilizante nitrogenado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, p.399-406, mar/2007. Disponível em: https://www.academia.edu/12766509/Nitrog%C3%AAnio_da_biomassa_microbiana_em_solo_de_Cerrado_com_aplica%C3%A7%C3%A3o_de_fertilizante_nitrogenado Acesso em: 30 nov. 2021

COSTA, K. A. P. et al. Doses e fontes de nitrogênio em pastagem de capim-Marandu. I- Alterações nas características químicas do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 32, p. 1591-1599, 2008. Disponível em: https://www.rbcsjournal.org/wp-content/uploads/articles_xml/0100-0683-rbcs-S0100-06832008000400023/0100-0683-rbcs-S0100-06832008000400023.x22228.pdf Acesso em: 30 nov. 2021

CUNHA, E.Q. *et al.* Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. II - atributos biológicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 35, n. 2, p. 603-611, 2011. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/bitstream/ri/14136/5/Artigo%20-%20Eur%20a2imi%20de%20Queiroz%20Cunha%20-%202011.pdf> Acesso em: 30 nov.2021

DADALTO, J. P. *et al.* Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.35, n.3, p.506-513, 2015.

DELARICA, D. DE L. D. *et al.* Atividade da desidrogenase em solos da região amazônica em recuperação, após mineração de cassiterita. *In: Congresso Brasileiro de Microbiologia Agropecuária, Agrícola e Ambiental*. 1., 2016, Jaboticabal. **Anais...**Jaboticabal: Centro de Convenções da UNESP, 2016.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: SSSA, 1994. v. 1, cap. 1, p. 3-21.

ELKHLIFI, Z. *et al.* Phosphate-lanthanum coated sewage sludge biochar improved the soil properties and growth of ryegrass in an alkaline soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 216, jun/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651321002840> Acesso em: 30 nov. 2021

EL-NAGGAR, A. *et al.* Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. **Geoderma**, v. 337, p.536-554, mar/2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706118309686> Acesso em: 30 nov. 2021

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro:EMBRAPA, 1997.

FERNANDES, A. L. S.; BRACHTVOGEL, E. L.; DOS REIS, L. L. Produção de massa seca, volume radicular e eficiência nutricional de fósforo em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e Massai (*Panicum maximum* x *P. infestum*). **Revista Pesquisa Agro**, v. 2, jul/dez 2019. Disponível em: <http://periodicos.cfs.ifmt.edu.br/periodicos/index.php/agro/article/view/582> Acesso em: 30 nov. 2021

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.4, dez/1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/rxFZGbfmkv3dmbY78GcVjQr/> Acesso em: 30 nov. 2021

FERNANDES, S. A. P.; BETTIOL, W.; CERRI, C. C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. **Applied Soil Ecology**, v.30, sep/2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139305000302?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021

FIGUEIREDO FILHO, D. B. et al. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson: O retorno. **Leviathan**, n.8, p.66-95, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/leviathan/article/view/132346> Acesso em: 30 nov. 2021

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION – FAO. **Status of the world's soil resource**: Main report. Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS), 2015.

FOOTE, J. A.; BOUTTON, T. W.; SCOTT, D. A. Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, Amsterdam, v. 355, p. 48-57, 2015.

FRIGHETTO, R. T. S. Análise da biomassa microbiana em carbono: método de fumigação-extração. *In*: FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. (coords) **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo**. Jaguariúna: Embrapa, 2000.

GADJA, A. M.; PRZEWLOKA, B.; GAWRYJOLEK, K. Changes in soil quality associated with tillage system Applied. **International Agrophysics**, v. 27, p. 133-141, 2013. Disponível em: <http://archive.sciendo.com/INTAG/intag.2013.27.issue-2/v10247-012-0078-7/v10247-012-0078-7.pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

GAO, S. *et al.* Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA. **Agriculture Ecosystems Environment**. 233, p.43-54, oct/2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880916304315> Acesso em: 30 nov. 2021

GARCIA T. C.; HERNANDEZ, T.; COSTA, F. Potential use of dehydrogenase activity as index of microbial activity in degraded soils. **Commun Soil Sci Plant Anal**. v.28, p.123-34, 1997. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103629709369777> Acesso em: 30 nov. 2021

GARDNER, F. P.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. **Physiology of crop plants**. Ames: The Iowa State University, 1985.
GIACOMETTI, C. *et al.* Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate fertilization regimes in temperate agroecosystems. **Applied Soil Ecology**, Elsevier, Amsterdam, v. 64, p. 32-48, 2013.

GOMES, T. C DE A. *et al.* Carbono orgânico, biomassa microbiana e nitrogênio em um solo cultivado com videira irrigada, sob sistema de manejo orgânico e convencional. Embrapa Semiárido. *In*: CONGRESSO LATINO-AMERICANO, 15.,

CONGRESO CUBANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 5., 2001, Varadero. **Anales**,.. Varadero: Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, 2001.

GONZÁLEZ, M. E. *et al.* Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material. **Sci. Total Environ**, 505, p. 446-453, feb/2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25461046/> Acesso em: 30 nov. 2021

GROSSMAN, J. M. *et al.* Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy. **Microb. Ecol.** 60, p.192–205, jul/2010. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/40802285> Acesso em: 30 nov. 2021

GUL, S. *et al.* Physicochemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Elsevier, Amsterdam, v. 206, p. 46-59, 2015.

GUL, S.; WHALEN, J. K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. **Soil Biology and Biochemistry** v.103, p.1-15, dec/2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071716301742> Acesso em: 30 nov. 2021

GWENZI, W. *et al.* Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe. **J Integr Agric.**, v.15, n.6, p. 1395-1406, jun/2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311915611546?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021

HATCH, D. J. *et al.* Nitrogen mineralization and microbial activity in permanent pastures amended with nitrogen fertilizer or dung. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, p. 288-293, jan/2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs003740050005> Acesso em: 30 nov. 2021

HATTEN, J.; LILES, G. Chapter 15 - A 'healthy' balance – The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. **Developments in Soil Science**, v.36, p. 373-396, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978044463998100015X> Acesso em: 30 nov. 2021

HAZRATI, S. *et al.* Functionalization of ultrasound enhanced sewage sludge-derived biochar: Physicochemical improvement and its effects on soil enzyme activities and heavy metals availability. **Chemosphere**, v. 269, apr/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520329659> Acesso em: 30 nov. 2021

HEIDARI, G., MOHAMMADI, K., SOHRABI, Y. Responses of soil microbial biomass and enzyme activities to tillage and fertilization systems in soybean (*Glycine max L.*) production. *Frontiers in Plant Science*, v.7, nov/2016. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.01730/full> Acesso em: 30 nov. 2021

HOSSAIN, M. K. *et al.* Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomate (*Lycopersicum esculentum*). **Chemosphere**, v, 78, n.9, p. 1167-1171, fev/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653510000275>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.85, n. 1-2, p. 442-446, may/2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237008001228>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e Interpretação. **Engineering and Science**, jun/2016. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3398> Acesso em: 30 nov. 2021

HOU, Q. *et al.* Responses of nitrification and bacterial community in three size aggregates of paddy soil to both of initial fertility and biochar addition. *Applied Soil Ecology*, v. 166, oct/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139321001244> Acesso em: 30 nov. 2021

HU, N. *et al.* Community size, activity and C: N stoichiometry of soil microorganisms following reforestation in a Karst region. **Eur. J. Soil Biol.**, 73, p. 77-83, mar/apr 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1164556316300073> Acesso em: 30 nov. 2021

HURTADO, S. M. C. *et al.* Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 688-697, 2010.

INGUANZO, M. *et al.* On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 63, n.1, p. 209-222, mar/2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237001001553?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2021.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – IPNI. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba:Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1998.

INYANG, M. *et al.* Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, v.101, n. 22, nov/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410010692?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. ***Agriculture, Ecosystem Environment***, Amsterdam, v. 79, 2000.

JAKELAITIS, A. *et al.* Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. ***Pesquisa Agropecuária Tropical***, Goiânia, v.38, p.118-127, 2008.

JEFFERY, L. S. *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. ***Agriculture, Ecosystems and Environment***, v.144, n. 1, p. 175-187, nov/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880911003197>. Acesso em: 29 nov. 2021

JIA, X. *et al.* Effects of nitrogen enrichment on soil microil characteristics: from biomass enzyme activities. ***Geoderma***, v. 366, may/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706120300604> Acesso em: 30 nov. 2021

KAMMANN, C. I. *et al.* Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. ***Scientific Reports***, v.5, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep11080/> Acesso em: 30 nov. 2021

KARHU, K. *et al.* Potential of biochar soil amendments to reduce N leaching in boreal field conditions estimated using the resin bag method. ***Agriculture, Ecosystems and Environment***, v.36, aug/2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880921001560?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. ***Soil Biology and Biochemistry***, v.42, n.1, p.1-13, jan/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071709003095> Acesso em: 30 nov. 2021

KLOSS, S. *et al.* Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. ***Journal Environment Quality***, v. 41, n.4, p. 990-1000, 2012. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2011.0070> Acesso em: 30 nov. 2021

KOLB, S. E.; FERMANICH, K. J.; DORNBUSH, M. E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 73, n. 4, p. 1173-1181, 2009. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20093252306> Acesso em: 30 nov. 2021

KURAMAE, E. E. *et al.* Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type. **FEMS Microbiology Ecology**, Oxford, UK, v. 79, n. 1, p. 12-24, 2012.

LAN, Z. M. *et al.* Stoichiometric ratio of dissolved organic carbon to nitrate regulates nitrous oxide emission from the biochar-amended soils. **Sci. Total Environ.**, v.576, p. 559-571, jan/2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716323063> Acesso em: 30 nov. 2021

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota – a review. **Soil Biol. Biochem**, v. 43, n.9, p. 1812-1836, sep/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071711001805>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LI, S.; LIANG, C.; SHANGGUAN, Z. Effects of apple branch biochar on soil C mineralization and nutrient cycling under two levels of N. *Science of The Total Environment*, v. 607-608, p. 109-119, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28688253/> Acesso em: 30 nov. 2021

LIANG, B. *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.70, p. 1719–1730, sep/2006. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2005.0383> Acesso em: 30 nov. 2021

LIANG, X. Q. *et al.* Simple N balance assessment for optimizing the biochar amendment level in Paddy Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, p.1247-1258, may/2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2013.875192> Acesso em: 30 nov. 2021

LIU, T.; LIU, B.; ZHANG, W. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.23, n. 1, p. 271-275, 2014. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Nutrients-and-Heavy-Metals-in-Biochar-Produced-by-Liu-Liu/6552358934b6cbcc5500b7c658b9ae61dfbe3ebe>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LOBO, T.F. *et al.* Manejo do lodo de esgoto e nitrogênio mineral na fertilidade do solo ao longo do tempo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2705-2726, 2013.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2. ed., rev. e atual. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MANCA, A. *et al.* Composed sewage sludge with sugarcane bagasse as a commercial substrate for Eucalyptus urograndis seedling production. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, oct/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620321922> Acesso em: 30 nov. 2021

MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Carbono, carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática em um solo sob mata natural, pastagem e cultura do algodoeiro. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p. 257-263, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Q4qwFb4bCBFSn8sKbsLHJqD/?format=pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

MARTUSCELLO, J. A. *et al.* Características morfogênicas e estruturais do capim-Xaraés submetido à adubação nitrogenada e desfolhação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1475-1486, 2005.

MATIAS, M. C. B. *et al.* Biomassa microbiana e estoques de C e N do solo em diferentes sistemas de manejo, no Cerrado do Estado do Piauí. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v. 31, p. 517-521, 2009.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.425-433, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288911880_Biomassa_microbiana_e_atividade_enzimatica_em_solos_sob_vegetacao_nativa_e_sistemas_agricolas_anuais_e_perenes_na_regiao_de_Primavera_do_Leste_MT Acesso em: 30 nov. 2021

MENDEZ, A. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on composted sewage sludge biochar priming effect in a loamy soil. **Chemosphere**, v. 93, n. 4, p. 668-676, oct/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513008369> Acesso em: 30 nov. 2021

MÉNDEZ, A. *et al.* The effect of sewage sludge biochar on peat-based growing media. **Biological Agriculture and Horticulture**, v. 8765, 2016. Disponível em: https://oa.upm.es/56536/1/INVE_MEM_2017_305302.pdf Acesso em: 30 nov. 2021

MERCANTE, F. M. *et al.* Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 4, p. 479-485, 2008. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/5301> Acesso em: 30 nov. 2021

MERCANTE, F. M. *et al.* **Parâmetros Microbiológicos como Indicadores da Qualidade do Solo sob Sistemas Integrados de Produção Agropecuária.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2004.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002.

MOURA, J. A. *et al.* Respiração basal e relação de estratificação em solo cultivado com citros e tratado com resíduos orgânicos no estado do Sergipe. **Seminário: Ciências Agrárias**, Londrina, v.36, p. 731-746, 2015.

NELISSEN, V. *et al.* Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 55 p. 20-27, dec/2012.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071712002349> Acesso em: 30 nov. 2021

NYAWADE, S. O. *et al.* Short-term dynamics of soil organic matter fractions and microbial activity in smallholder potato-legume intercropping systems. **Applied Soil Ecology**, v. 142, p. 123-135, oct/2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139318314148> Acesso em: 30 nov. 2021

OK, Y. S. *et al.* SMART biochar technology – a shifting paradigm towards advanced materials and healthcare research. **Environ. Technol. Innov.**, v.4, p. 206-209, oct/2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186415000334> Acesso em: 30 nov. 2021

ORAM, N. J. *et al.* Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.191, p.92-98, 2014. Disponível em:

<https://research.wur.nl/en/publications/soil-amendment-with-biochar-increases-the-competitive-ability-of-> Acesso em: 30 nov. 2021

PARKIN, T.B.; DORAN, J.W.; FRANCO-VIZCAINO, E. Field and laboratory tests of soil respiration. *In*: Doran, J.W. & Jones, A. (Eds) - Method for Assessing Soil Quality, SSSA Special Publication, **Madison, Soil Science Society of America**, p. 231-245, 1996.

PAUL, E.A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry.** 3 ed. San Diego: Academic Press, 2007. 579 p.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n. 7, p. 761-768, ab/2012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/QdpF8VmVnngZ5fPqv3LPbsj/?format=pdf&lang=en>
Acesso em: 30 nov. 2021

PIRES, A. M. M.; MATTIAZZO, M. E. **Avaliação da viabilidade do uso de resíduos na agricultura**: Circular Técnica 19. Jaguariúna: Embrapa, 2008.

PRAYOGO, C. *et al.* Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. *Biology and Fertility of Soils*, v.50, p. 659-702, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00374-013-0884-5> Acesso em: 30 nov. 2021

PRIMAVESI, A.C. *et al.* Absorção de cátions e ânions pelo capim-Coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.40, p.247-253, mar/2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/5pbzvShXCb95hG6DYFc3v5N/?format=pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L.A.; PRIMAVESI, A.C. **Adubação com uréia em pastagem de *Cynodon dactylon* cv. Coastcross sob manejo rotacionado**: eficiência e perdas: Circular Técnica, 30. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste 2001.

RAIJ, B. VAN. *et al* (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.

RAIJ, B van *et al.* (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. (Boletim Técnico, v.100).

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: Potafos, 1991.

RAMOS, M. L. G. *et al.* Efeito de doses de nitrogênio via fertirrigação na dinâmica microbiana, em solo cultivado com trigo. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 26, p. 376-383, 2010.

RASUL, G. *et al.* Salinity-induced changes in the microbial use of sugarcane filter cake added to soil. **Applied Soil Ecology**, v. 31, n. 1-2, p. 1-10, jan/2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139305000995> Acesso em: 30 nov. 2021

REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. de C. **Biomassa microbiana do solo**.: Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, 1988.

REY, E. *et al.* Impact of land degradation on soil respiration in a steppe (*Stipa tenacissima* L.) semi-arid ecosystem in the SE of Spain. **Soil Biol. Biochem.**, v.43, n.2, p. 393-403, 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003807171000427X> Acesso em: 30 nov. 2021

RODELLA, A. A.; SABOYA, L. V. Calibration of conductimetric determination of carbon dioxide. **Soil Biology and Biochemistry**, v.31, p.2059-2060, 1999.

ROSA, J. M. DE LA. *et al.* Relating physical and chemical properties of four different biochars and their application rate to biomass production of *Lolium perenne* on a Calcic Cambisol during a pot experiment of 79 days. **Science of the Total Environment**, v, 499, p. 175–184, nov/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714011929> Acesso em: 30 nov. 2021

ROSSI, C.; MONTEIRO, F.A. Doses de fósforo, épocas de coleta e o crescimento e diagnose nutricional nos capins braquiária e colônia. **Sci. Agric.**, v.56, n. 4, p. 1101-1110, 1999. Disponível em: [https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/scientia-agricola/56-\(1999\)-4/doses-de-fosforo-epocas-de-coleta-e-o-crescimento-e-diagnose-nutricional/](https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/scientia-agricola/56-(1999)-4/doses-de-fosforo-epocas-de-coleta-e-o-crescimento-e-diagnose-nutricional/) Acesso em: 30 nov. 2021

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Embrapa Agropecuária Oeste, 2014.

SAMPAIO, D. B.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B. Avaliação de indicadores biológicos de qualidade do solo sob sistemas de cultivo convencional e orgânico de frutas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 353-359, mar/abr 2008. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-483330> Acesso em: 30 nov. 2021

SANTOS, L. P. D. *et al.* Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.12, n.3, p.270-279, 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104525/1/Doses-nitrogenio.pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

SCHNURER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, 43, p.1256-1261, jun/1982. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC244223/> Acesso em: 30 nov. 2021
SCHOMBERG, H. H. *et al.* Influence of Biochar on Nitrogen Fractions in a Coastal Plain Soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n, 4, p. 1087-1095, 2012. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2011.0133> Acesso em: 30 nov. 2021

SINGH, G. *et al.* Assesment of soil fertility status under different cropping sequences in District Kapurthala. *J. Krishi Vigyan*, v.5, n. 1, p. 1-9, oct/2016. Disponível em: <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:jkv&volume=5&issue=1&article=001> Acesso em: 30 nov. 2021

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P.H.S.; DE-POLLI, H. **Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (BMS-C)**. Comunicado Técnico 98. Brasília:Embrapa, 2007.

SILVA, D. K. A. *et al.* Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forests and conventional sugarcane plantations in Brazil. *Geoderma*, v.189-190, p. 257-261, nov/2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706112002492?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021

SILVA, D. M. *et al.* Indicadores microbiológicos de solo em pastagem com aplicação sucessiva de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, 2015a. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/wp-content/uploads/2016/01/V39N6a08.pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

SILVA, T. S. *et al.* Avaliação da Respiração Basal do Solo (RBS) sob diferentes sistemas de manejo em áreas de Cerrado. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO: O SOLO E SUAS MÚLTIPLAS FUNÇÕES*, 35., 2015, Natal. **Anais...** Natal:SBCS, 2015.

SILVA, R.R. da. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1584-1592, 2010. Disponível em : https://www.rbcjournal.org/wp-content/uploads/articles_xml/0100-0683-rbcs-S0100-06832010000500011/0100-0683-rbcs-S0100-06832010000500011.pdf Acesso em: 30 nov. 2021

SILVAN, N. *et al.* J.Microbial immobilisation of added nitrogen and phosphorus in constructed wetland buffer. **Applied Soil Ecology**, v.24, n.2, p.143-149, oct/2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139303000921> Acesso em: 30 nov. 2021

SILVEIRA, A. de O. **Avaliação de metodologias para o monitoramento da qualidade do solo**. 2011. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Departamento de Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2011.

SMIDER, B.; SINGH, B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 191, p. 99-107, jun/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880914000462>. Acesso em: 29 nov. 2021

SOINNE, H. *et al.* Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. **Geoderma**, v.219-220, p. 162-167, may/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706113004503> Acesso em: 30 nov. 2021

SOMMAGGIO, L.R.D. *et al.* Ecotoxicological and microbiological assessment of sewage sludge associated with sugarcane bagasse. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 147, p. 550 – 557, jan/2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651317305808> Acesso em: 30 nov. 2021

SONG, Y. *et al.* Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil. *Biology and Fertility of Soils*, v. 50, p.321-332, sept/2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-013-0857-8> Acesso em: 30 nov. 2021

SOUSA, A. A. T. C. **Biochar de lodo de esgoto**: efeitos no solo e na planta no cultivo de rabanete. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2015.

SOUZA, T. T.; LIMA, A. B.; TEIXEIRA, W. G. O aumento da capacidade troca de cátions (CTC) do solo através da aplicação de carvão vegetal em um latossolo amarelo na Amazônia Central. *In*: REUNIÃO DA SBPC, 61., 2009, Manaus. **Anais...** Manaus:SBPC, 2009.

STAMFORD, N. P. *et al.* Effect of rhizobia and rock biofertilizers with *Acidithiobacillus* on cowpea nodulation and nutrients uptake in a tableland soil. **World Journ of Microbiology and Biotechnology**, v.24, p.1857-1865, feb/2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-008-9684-8> Acesso em: 30 nov. 2021

SWISHER, R.; CARROLL, C.G. Fluorescein diacetate hydrolysis as an estimator of microbial biomass on coniferous needle surface. **Microbial Ecology**, v.6, p.217-226, sept/1980. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2F02010387> Acesso em: 30 nov. 2021

TALMON, Y.; STERNBERG, M.; GRÜNZWEIG, J.M. Impact of rainfall manipulations and biotic controls on soil respiration in Mediterranean and desert ecosystems along an aridity gradient. **Glob. Change Biol.**, v.17, n.2, p. 1108-1118, jan/2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2010.02285.x> Acesso em: 30 nov. 2021

TAMMEORG, P. *et al.* Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. **Agriculture, Ecosystems and Environment.**, v. 191, p.108-116, jun/2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880914000292> Acesso em: 30 nov. 2021

TANG, X. *et al.* Soil atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O efflux in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, v. 12, n.3, p.546-560, mar/2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2006.01109.x> Acesso em: 30 nov. 2021

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed., Porto Alegre:Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. (Boletim Técnico, 5).

THIES, J. E.; RILLIG, M. C. Characteristics of biochar: biological properties. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.) **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. London: Earthscan, 2009. p. 183-205.

TIAN, K. *et al.* Investigation on the Evolution of N-Containing Organic Compounds during Pyrolysis of Sewage Sludge. *Environment Science Thechnology*, v. 48, p. 10888-10896, 2014. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es5022137>
Acesso em: 30 nov. 2021

TOMÉ JR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Avaliação agronômica de um bio sólido industrial para a cultura do milho. **Pesq. Agropec. Bras.**, 40:261-269, mar/2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/250029847_Avaliacao_agronomica_d_e_um_biossolido_industrial_para_a_cultura_do_milho Acesso em: 30 nov. 2021

TRAZZI, P. A. *et al.* Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/32128> Acesso em: 30 nov. 2021

TYLER, H. L. Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. **Pedobiologia**, v.81-82, sept/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003140562030055X> Acesso em: 30 nov. 2021

TU, C.; RISTAINO, J.B.; HU, S. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching. **Soil Biol. Biochem.**, v.38, p.247-255, feb/2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071705001951?via%3DiHub> Acesso em: 30 nov. 2021

UZOMA, K. C. *et al.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 2, p. 205-212, apr/2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>
Acesso em: 29 nov. 2021.

VAN OS, G. J.; GINKEL, J. H. Suppression of Pythium root rot in bulbous Iris in relation to biomass and activity of the soil microflora. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 11, p. 1447-1454, sept/2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071701000530> Acesso em: 30 nov. 2021

VARGAS, L.K.; SELBACH, P.A.; SÁ, E.L.S. de. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v.35, n.1, p.76-83, jan/fev 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/zKHZmKxrkTPhfbDz8gZW3N/?format=pdf> Acesso em: 30 nov. 2021

VIEIRA, G. A.; CASTILHOS, D.D.; CASTILHOS, R.M.V. Atributos microbianos do solo após a adição de lodo anaeróbio da estação de tratamento de efluentes de parboilização do arroz. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 543- 550, 2011.

WAGAI, R. *et al.* Linking temperature sensitivity of soil organic matter decomposition to its molecular structure, accessibility, and microbial physiology. **Global Change Biol.**, v.19, n. 4, p. 1114-1125, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12112> Acesso em: 30 nov. 2021

WALKLEY A; BLACK I. A. Na examination of the Degtjareff method for determining organic matter and proposed modification of the chromica cidtitration method. **Soil Science**, Madison. v. 63, p. 251-264, 1934.

WANG, J. *et al.* Nitrogen addition reduces soil respiration but increases the relative contribution of heterotrophic component in an alpine meadow. **Funct. Ecol.**, v.33, n.11, p. 2239-2253, aug/2019. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2435.13433> Acesso em: 30 nov. 2021

WANG, X. B. *et al.* Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil. **Appl. Soil Ecol.**, v. 96, p.265–272, nov/2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139315300718> Acesso em: 30 nov. 2021

YADA, M. M. *et al.* Atributos Químicos e Bioquímicos em Solos Degradados por Mineração de Estanho e em Fase de Recuperação em Ecossistema Amazônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 714-724, may/jun 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/97vZN9QrbxWSJnVYCDh6kVd/abstract/?lang=pt> Acesso em: 30 nov. 2021

YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. *In*: SIMPÓSIO SOBRE NITROGÊNIO E ENXOFRE NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 2007, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba:IPNI, 2007. 1-722p. Disponível em: [https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/ea cab2541ec728830325844f0074968f/\\$FILE/Nitrog%C3%AAnio%20e%20Enxofre%20na%20Agricultura%20Brasileira%20-%20Sum%C3%A1rio.pdf](https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/ea cab2541ec728830325844f0074968f/$FILE/Nitrog%C3%AAnio%20e%20Enxofre%20na%20Agricultura%20Brasileira%20-%20Sum%C3%A1rio.pdf). Acesso em: 29 nov. 2020.

YANG, W. *et al.* Application of rapeseed residue increases soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activity and mitigates cadmium pollution risk in paddy Fields. **Environmental Pollution**, v. 264, sept/2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119341417> Acesso em: 30 nov. 2021

ZAMAN, M. *et al.* Changes in mineral N, microbial biomass and enzyme activities in different soil depths after surface applications of dairy shed effluent and chemical fertilizer. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.63, p.275-290, 2002.

ZHANG, A. *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, v.127, p.153-160, feb/2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842901100387X> Acesso em: 30 nov. 2021

ZHANG, N. *et al.* Pedogenic carbonate and soil dehydrogenase activity in response to soil organic matter in *Artemisia ordosica* Community. **Pedosphere**, v. 20, n.2, p. 229-235, apr/2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016010600100> Acesso em: 30 nov. 2021

ZHANG, H.; VORONEY, R. P.; PRICE, G. W. Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. **Soil Biology and Biochemistry**, p. 19-28, apr/2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071715000188> Acesso em: 30 nov. 2021

ZHANG, X. *et al.* Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 536, p. 59-67, 2015.

ZHENG, H. *et al.* Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. **Geoderma**, v.206, p. 32-39, sept/2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706113001365> Acesso em: 30 nov. 2021

ZIMMERMAN, A. R.; GAO, B.; AHN, M. Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n.6, p.1169-1179, jun/2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071711000769?via%3Dihub> Acesso em: 30 nov. 2021