http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2022.v14.e394
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 17/08/2022 Revisado: 22/08/2022 Aceito: 02/09/2022

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE BIOCARVÕES PRODUZIDOS A PARTIR DE BIOSSÓLIDO E BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

CHARACTERIZATION CHEMICAL OF BIOCHARS PRODUCED FROM BIOSOLID AND SUGARCANE BAGASSE

Janardelly Gomes de Souza, Marcelo Rodrigo Alves

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, Presidente Prudente, SP.
E-mail: janardelly.jgs@gmail.com

RESUMO – A caracterização adequada de resíduos sólidos 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, para analisar sua viabilidade de uso no solo. Assim, 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. 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 das matérias-primas e biocarvões foi por meio das análises imediatas, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, matéria orgânica, nitrogênio total, capacidade de troca catiônica, e espectrometria de fluorescência de raio-X. 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 ($p<0,05$). O BP e o BB obtiveram pH mais alcalino, maior teor de cinzas, maior teor de nitrogênio e capacidade de troca catiônica. Enquanto o BCP e BBC apresentaram maior valor para a matéria orgânica e carbono. 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.

ABSTRACT – The adequate characterization of solid residues is important, as it makes it possible to estimate the variability of its composition, helping to define its use in the soil. The objective of the presente study was to characterize raw materials and biochars produced under laboratory conditions, in order to analyze their feasibiity for use in the soil. Thus, the biochars were produced from the dry sample of biosolid and, from a dry sample of sugarcane bagasse, separately, by means of slow pyrolysis at a temperature of 350°C. A design with five replications was used, where the treatments were constituted by: pure biosolid (BP); pure sugarcane bagasse (BCP); biosolid biochar (BB); sugarcane bagasse biochar (BBC). The evaluation of raw materials and biochars was through immediate analysis, hydrogenion potential, electrical

conductivity, organic matter, total nitrogen, cátion Exchange capacity, and X-ray fluorescence spectrometry. The data obtained in the characterization of the materials were submited to analysis of variance by the SISVAR program. To compare the means, the Tukey test was used program. To compare the means, the Tukey test was used at 5% probability ($p<0.05$). BP and BB had more alcaline pH, higher ash contente, higher nitrogen content and cátion Exchange capacity. While the BCP nd BBC showed higher values for organic matter and carbono. The raw materials and their respective biochars showed characteristics suitable for agricultural use, mainly BP and BB, and BP and BB can be used as soil correctors, as They have na alcaline pH of 12.02 and 9.64.

Keywords: Biosolid; Sugarcane Bagasse; Pyrolysis; Soil Attributes.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a demanda global por produtividade deve aumentar de 59 a 98% até 2050, de modo que a degradação da fertilidade do solo e o esgotamento dos nutrientes são ameaças comuns aos agroecossistemas e, um desafio para as práticas agrícolas (FAO, 2017; PRADHAN *et al*., 2020).

Por meio da aplicação de resíduos orgânicos em solos agrícolas, o emprego de condicionador de solo vem se tornando um método de gestão estratégica atrativo, por poder substituir parcialmente o uso de fertilizantes químicos, como fosfato e fertilizantes nitrogenados e, assim, reduzir custos e gasto energético (YAGMUR *et al*., 2017; MELO *et al*., 2018; DHANKER *et al*., 2021).

Esses fertilizantes químicos por mais que forneçam nutrientes prontamente disponíveis as plantas, aumentando sua produtividade, também podem deteriorar a saúde do solo se usado por muito tempo (HERNANDEZ *et al*., 2016).

O lodo de esgoto é um resíduo sólido produzido em grandes quantidades nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's), gerado no processo de tratamento de esgoto sanitário, por processo de decantação primária, biológico ou químico (BRASIL, 2020). Quando tratado e processado o lodo recebe o nome de biossólido (BARBOSA; FILHO, 2006). No Brasil a produção de biossólido atinge cerca de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano (MANCA *et al*., 2020).

O uso do biossólido em solos é uma alternativa de destinação ambientalmente adequada e se enquadra nos princípios de reciclagem de resíduos em consonância com a Lei n°12.305 de 2010 (BRASIL, 2020). Pois, é um material orgânico 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 (LOBO *et al*., 2013).

Esses elementos são importantes para o crescimento das plantas, sendo assim, quando utilizado para fins de condicionante de solo pode melhorar a fertilidade, proporcionando melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (SCOTTI *et al*., 2016). Podendo ainda contribuir na formação de agregados estáveis do solo, melhora a aeração do solo, a exploração da água e a capacidade de troca de cátions (MATTANA *et al*., 2014, ALVARENGA *et al*., 2017; DHANKER *et al*., 2021).

No entanto, segundo a Resolução Federal do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA n°498 de 2020, há limitações para a utilização do biossólido em solos agrícolas. Dessa forma, a transformação desse resíduo em biocarvão, subproduto rico em carbono, através do processo térmico, pirólise, torna-se uma boa opção. Pois, esse processo transforma o biossólido em um material livre de organismos patogênicos e ricos em nutrientes como nitrogênio, fósforo, cálcio e zinco (PAZ-FERREIRO *et al*., 2018; FACHINI; FIGUEIREDO, 2022).

Segundo Bridgwater (2012), a pirólise é uma reação endotérmica que decompõe 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 (biogás). Esse processo é afetado principalmente pela temperatura, pelo tempo de residência do material, pela taxa de

aquecimento, pela vazão do gás inerte e pelo tipo e grau de moagem do material (SAKHIYA *et al*., 2020).

Existem dois tipos de pirólise: a lenta (que varia de 300°C a 600°C) e a rápida (> 500°C). A primeira é uma sequência de reações com baixas taxas de aquecimento (°C/s) e um tempo de residência com 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 um tempo de residência com curtas durações, produzindo principalmente vapores e aerossóis, além de carvão (LEHMANN; STEPHEN, 2009).

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). Segundo Trazzi *et al*. (2018) 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.

Dentro deste contexto, outro resíduo que também pode ser estudado para possível inserção ao solo é o bagaço de cana-de-açúcar. No Brasil, são produzidos aproximadamente 178 milhões de toneladas desse resíduo lignocelulósico do setor agroindustrial (SCHMITT *et al*., 2020).

Neste sentido, o presente estudo objetivou caracterizar as matérias-primas e seus respectivos biocarvões produzidos em condições de laboratório, para analisar sua viabilidade de uso no solo. Pois a caracterização de resíduos possibilita estimar a variabilidade de sua composição, auxiliando na definição do seu uso 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, no município de Presidente Prudente, estado de São Paulo.

2.2. Produção de biocarvões

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.

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. 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 50ºC, 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.

2.3. Caracterização das matérias-primas e biocarvões

Para realização da caracterização química dos materiais foi utilizado o delineamento com cinco repetições, sendo que 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), perfazendo um total de 20 amostras.

2.3.1. Análises 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.

2.3.2. Análises de pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, nitrogênio total e capacidade de troca catiônica

As análises de potencial hidrogeniônico (pH) e de condutividade elétrica (C.E.) foram determinadas, segundo a metodologia proposta por Rajkovich *et al*. (2012).

A capacidade de troca catiônica foi determinada seguindo a metodologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para fertilizantes orgânicos (BRASIL, 2007). E as demais foram realizadas segundo a metodologia do Laboratório de Tecidos Vegetais da Universidade do Oeste Paulista.

2.3.3. Análise de espectrometria de fluorescência de raio x

Essa análise foi realizada no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos – LCGRS/Laboratório de Materiais Cerâmicos – LaMaC da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Presidente Prudente – SP.

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 Shimatzu, 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.

A FRX possibilita a determinação simultânea ou sequencial da concentração de elementos enquadrados entre o sódio e urânio – Na e U (WASTOWSKI *et al*., 2010).

2.3.4. Análise de dados

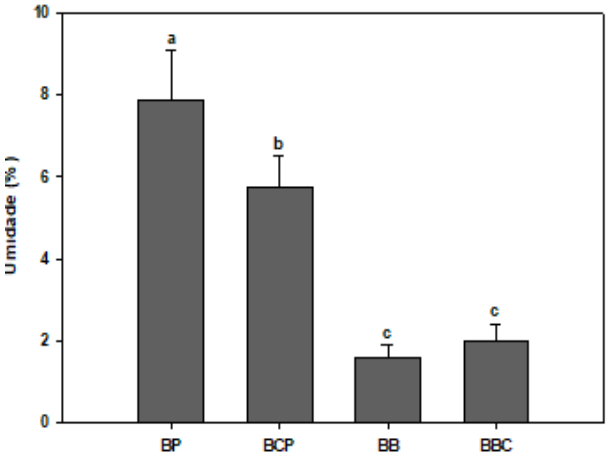
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, ANOVA, pelo programa SISVAR. Para comparação de médias, foi utilizado o teste Tukey a 5% de probabilidade ($p<0,05$), e os gráficos foram gerados por meio do Sigmaplot®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análises imediatas

Os menores valores da umidade foram evidenciados nos biocarvões (Figura 1), o que de certa forma já era esperado, pois no processo de pirólise, a partir da temperatura de 120°C, a matéria-prima começa a sofrer modificações perdendo umidade (DOWNIE; CRSOCKY; MUNROE, 2009; CONZ *et al*., 2017).

Figura 1. Teor de umidade nas matérias-primas e biocarvões

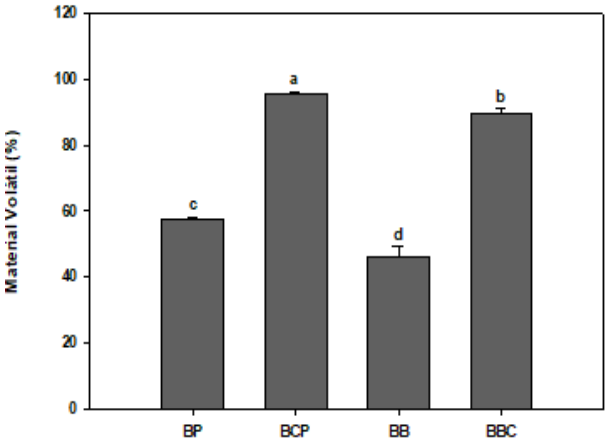


Fonte: (Autor, 2022).

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 Tukey a 5% de probabilidade ($p<0,05$).

Para matérias voláteis os maiores valores foram obtidos no BCP e BBC, 95,49% e 89,68%, comparado aos demais (Figura 2). Joseph *et al*. (2009) mencionam que o material volátil é considerado a porção da massa da material original que é perdida durante a pirólise, sendo composta de materiais lábeis. 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.

Figura 2. Teor de material volátil nas matérias-primas e biocarvões

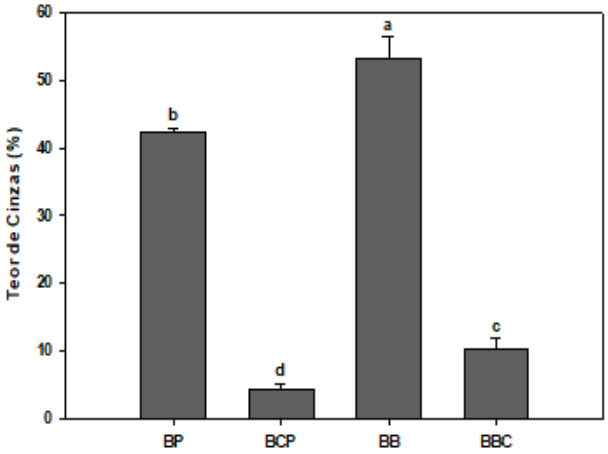


Fonte: (Autor, 2022).

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 Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

O BB apresentou maior de teor de cinzas, de 53,20% (Figura 3). Esse maior valor presente 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. Em seus estudos, esses autores evidenciaram 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.

Figura 3. Teor de cinzas nas matérias-primas e biocarvões

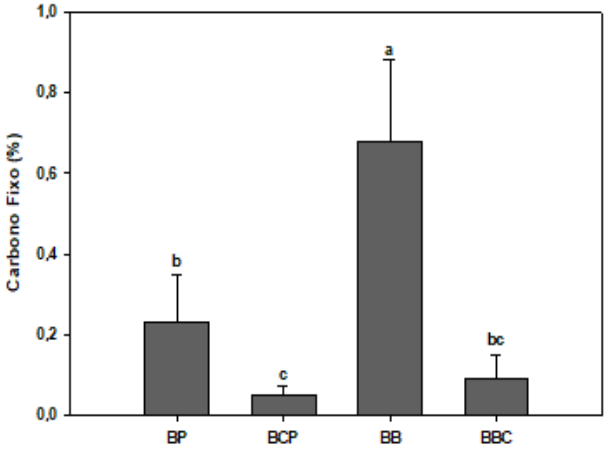


Fonte: (Autor, 2022).

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 Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

O BB também obteve maior valor de carbono fixo, evidenciando significância em relação aos demais (Figura 4). O carbono fixo vem a ser a parte do material mais resistente que permanece no biocarvão após a pirólise (AMONETTE, JOSEPH, 2009; CONZ *et al*., 2017). Esses baixos valores de carbono fixo podem estar relacionados ao alto teor de voláteis e cinzas.

Figura 4. Teor de carbono fixo nas matérias-primas e biocarvões



Fonte: (Autor, 2022).

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 Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

3.2. Determinação do pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, nitrogênio total e capacidade de troca catiônica

O pH do solo é um importante parâmetro, pois desempenha um papel crucial no ciclismo de nutrientes e na translocação de elementos potencialmente tóxicos (CHEN *et al.*, 2021). 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 de 12,02 (Tabela 1). Podendo 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). E, biocarvões produzidos a partir de produtos não madeireiros possuem um pH mais elevado, sendo que isso pode ocorrer devido a presença de espécies químicas, carbonatos e outros sais (LEHMANN *et al*., 2011).

O BP e BB também evidenciaram maiores valores para a condutividade elétrica, podendo

estar relacionado ao conteúdo de nutrientes presentes na matéria-prima, pois biocarvões provenientes de resíduos animais contêm maiores valores (CONZ *et al*., 2017; JOSEPH *et al*., 2010; SINGH; SINGH; COWIE, 2010).

O BCP obteve maior valor para matéria orgânica, seguido pelo BBC, pois é um resíduo lignocelulósico rico em carbono, mas evidenciou baixo teor de nitrogênio, sendo que o maior valor de N-total foi no BP. Corroborando desta forma com Melo & Marques (2000), Bettiol & Camargo (2006), pois mencionam que o biossólido típico apresenta entorno de 40% de matéria orgânica e 4% de nitrogênio.

O BP apresentou maiores valores para CTC, importante parâmetro para fertilidade do solo, seguido pelo BB.

Tabela 1. Valores de pH, CE, MO, N e CTC

	pH	CE	MO	N	CTC
		µS	g dm^{-3}	g kg^{-1}	$mmol_c kg^{-1}$
BP	12,02a	1498,60ª	460,54c	36,62a	865,93a
BCP	6,10d	266,48d	925,92a	2,32c	112,39c
BB	9,64b	1036,00b	327,52d	27,52b	725,14b
BBC	8,11c	291,40c	864,75b	4,92c	52,00d
CV%	1,00	2,09	3,29	5,45	2,44
DMS	0,15	22,24	39,73	2,88	23,04

Fonte: (Autor, 2022).

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 Tukey a 5% de probabilidade ($p<0,05$).

3.3. Espectrometria de fluorescência de raio x

Para o biossólido os elementos mais representativos foram C, Ca, Si, Fe, S, Al, P, Ti e K (Tabela 2). 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 de 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.

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 2. Valores de elementos químicos presentes nas matérias-primas e biocarvões (%)

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: (Autor, 2022).

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.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biocarvão de biossólido evidenciou maiores valores de nutrientes quando comparado ao biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar, podendo estar relacionado ao alto teor de cinzas, de 53,20%, quando comparado ao BBC. Apresentou uma CTC elevado de 725,14 $mmol_c$ kg^{-1} , parâmetro este de suma importância em relação a fertilidade do solo. E, quanto ao pH notou-se que o BP e o BB apresentaram pH alcalino podendo estar relacionado a quantidade de Ca presente no material, sendo que a alcalinidade é um fator muito importante por estar ligado a inativação de microrganismos no biossólido.

Conclui-se, de modo geral, que ambos os materiais, puros ou pirolisados, podem trazer alterações quando aplicados ao solo, pois apresentaram características propícias para uso agrícola, mas o BP e o BB se destacam em relação ao BCP e BBC.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, P. *et al*. Recycling organic wastes to agricultural land as a way to improve its quality: A field study to ecaluate benefits and risks. **Waste Management,** v. 61, p. 582-592, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D1762-84:** Chemicalanalysis of wood charcoal. West Conshohocken: ASTM International, 2007, 2p. 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:** London: Science and Technology, Earthscan, 2009 p. 33-52..

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. 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, 2006.

https://doi.org/10.5433/1679-0359.2006v27n4p565

BARROS, I. T. *et al*. Avaliação agronômica de biossólido tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **Rev. Bras. Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 15, n. 6, p. 630-638, 2011. https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600014

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, p.25-36, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.. **Instrução Normativa SDA Nº 17, de 21 de maio 2007**. Brasília: MAPA, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498 de 19 de agosto de 2020. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília - DF, 21 de agosto de 2020.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass Bioenergy,** v. 38, p. 68-94, 2012. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

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, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125811

CLOUGH, T. J.; CONDRON, L. M. Biochar and the nitrogen cycle: introduction. **J. Environ. Qual**., v. 39, p. 1218-1223, 2010. https://doi.org/10.2134/jeq2010.0204

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, 2017. https://doi.org/10.4236/as.2017.89067

DHANKER, R. *et al*. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters. **Environmental Technology & Innovation,** v. 23, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101642

DOWNIE, A.; CROSCKY, 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.

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, 2019. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034

ENDERS, A. *et al*. Characterization of biochar to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioressource Technology**, v. 114, p.644-653, 2012. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022

FACHINI, J.; FIGUEIREDO, C. C. Pyrolysis of sewage sludge: physical, chemical, morphological and mineralogical transformations. **Brazilian Archives of Biology and Technology,** v. 65, 2022. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210592
FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION – FAO. **The future of food and agriculture**, [*S. l*.: *s. n*.], 2017.

HERNANDEZ, T. *et al*. Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (Lactuca sativa l.) crops-effects on soil and plant. **Soil Tillage Res**, v. 160, p. 14-22, 2016. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.005

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, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104004

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. https://doi.org/10.1071/SR10009

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, 2017. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.119

LEHMANN, J. *et al*. Biochar effects on soil biota-a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p.

1812-1836, 2011. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022

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

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. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6p2705

MANCA, A. *et al*. Composed sewage sludge with sugarcane bagasse as a comercial substrate for Eucalyptus urograndis seedling production. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122145

MATTANA, S. *et al.* Sewage sludge processing determines its impacto n soil microbial Community structure and function. **Appl. Soil Ecol.,** v. 75, p. 150-161, 2014 https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.11.007

MELO, W. *et al.* Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Sci. Total Environ**., v. 643, p. 1493-1501, 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254

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, p.109-141, 2000.

PAZ-FERREIRO, J. *et al.* Biochar from biosolids pyrolysis: a review. Int. **J. Environ. Res. Public Health,** v. 15, n. 5, 2018. https://doi.org/10.3390/ijerph15050956

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

PRADHAN, S. *et al*. Biochar from vegetable wastes: agro-environmental characterization. **Biochar**, v. 2, p. 439-453, 2020. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00069-9

RAJKOVICH, S. *et al*. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, p. 271-284, 2012. https://doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7

SAKHIYA, A. K.; ANAD, A.; KAUSSHAL, P. Production, activation, and applications of biochar in recente times. **Biochar,** 2020. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1

SCOTTI, R. *et al*. On-farm compost: A useful tool to improve soil quality under intensive farming systems. **Appl. Soil Ecol**., v. 107, p. 12-23, 2016. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.004

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, 2010. https://doi.org/10.1071/SR10058

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, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106199

TRAZZI, P. A. *et al*. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal,** v. 28, 2018. https://doi.org/10.5902/1980509832128

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. **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1449-1452, 2010. https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700005

YAGMUR, M.; ARPALI, H.; GULSER, F. The effects of sewage sludge treatment on triticale straw yield and its chemical contents in rainfed condition. **J. Anim. Plant Sci,** v. 27, p. 971-977, 2017.

ZHANG, H. *et al*. Efect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efcacy. **Biomass Bioenerg**, v. 105, p.136–146, 2017. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.024

ZHAO, L. *et al*. Hetergeneity of biochar properties as a function od feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials,** Amsterdam, v. 256-257, p. 1-9, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.015