



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS II
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
CURSO DE AGRONOMIA**

ANDREZZA MAIA DE LIMA

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO APÓS INCUBAÇÃO DO ARGISSOLO
COM DIFERENTES DOSES DE BIOCÁRVÕES**

**LAGOA SECA
2024**

ANDREZZA MAIA DE LIMA

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO APÓS INCUBAÇÃO DO ARGISSOLO
COM DIFERENTES DOSES DE BIOCÁRVÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado ao Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Área de concentração: Fertilidade do solo.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Élide Barbosa Corrêa.

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Lúcia Helena Garófalo Chaves.

**LAGOA SECA
2024**

L732a Lima, Andrezza Maia de.

Adsorção de fósforo após incubação do argissolo com diferentes doses de biocarvões. [manuscrito] / Andrezza Maia de Lima. - 2024.

27 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, 2024.

"Orientação : Profa. Dra. Élda Barbosa Corrêa ,
Coordenação do Curso de Agronomia - CCHA. "

"Coorientação: Profa. Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves ,
UFCG - Universidade Federal de Campina Grande "

1. Adubação orgânica. 2. Fertilidade do solo. 3. Substrato alternativo. I. Título

21. ed. CDD 631.8

ANDREZZA MAIA DE LIMA

ABSORÇÃO DE FÓSFORO APÓS INCUBAÇÃO DO ARGISSOLO
COM DIFERENTES DOSES DE BIOCARVÕES

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo)
apresentado ao Departamento do Curso
de Agronomia da Universidade Estadual
da Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Área de concentração: Fertilidade do solo

Aprovada em: 20/06/2014

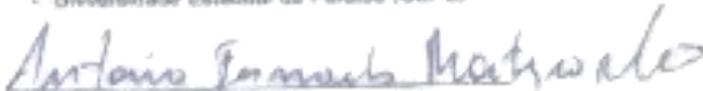
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Elide Barbosa Corrêa
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. M. Sc. Maria do Socorro Aguiar Duarte
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Dr. Antônio Fernandes Monteiro Filho
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	06
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	07
2.1	Caracterização da área experimental.....	07
2.2	Preparo e caracterização dos biocarvões.....	07
2.3	Influência dos biocarvões na fertilidade do solo.....	08
2.4	Delineamento experimental.....	09
2.5	Variáveis analisadas.....	09
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
3.1	pH e teor de fósforo do solo após incubação com diferentes biocarvões.....	10
3.2	Isotermas de adsorção.....	12
3.3	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	18
3.4	Difratometria de Raios X (DRX).....	21
4	CONCLUSÃO	23
	REFERÊNCIAS	23

ADSORÇÃO DE FÓSFORO APÓS INCUBAÇÃO DO ARGISSOLO COM DIFERENTES DOSES DE BIOCARVÕES

PHOSPHORUS ADSORPTION AFTER INCUBATION OF CLAY SOIL WITH DIFFERENT DOSES OF BIOCHAR

Andrezza Maia de Lima*
Élida Barbosa Corrêa**

RESUMO

Biocarvão é o produto do tratamento térmico da biomassa, em baixa atmosfera de oxigênio, em um processo conhecido como pirólise ou carbonização. Este produto vem sendo utilizado como condicionador de solo uma vez que reduz a acidez e a disponibilidade de Al, aumenta o pH e a disponibilidade de nutrientes às plantas, principalmente fósforo (P) e potássio (K). O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de adsorção de P pelo argissolo incubado com diferentes doses dos biocarvões provenientes de cama de aviário, fibra de coco e de palha de arroz, produzidos em forno do tipo “tambor”. Para tanto, foi realizado um experimento no Laboratório de Irrigação e Salinidade (ISL) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, PB, utilizando amostras de solo coletadas no Estado da Paraíba. Diferentes doses de biocarvões foram incorporadas às amostras de solo e incubadas por um período de 160 dias, mantendo sua umidade em torno de 70% da capacidade de campo, com adição de água deionizada. Após esse período, estas amostras foram utilizadas no estudo de adsorção de fósforo. Foram analisados pH e teor e fósforo do solo após incubação com diferentes biocarvões, parâmetros das isotermas de adsorção de P de Langmuir e Freundlich, Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Difratometria de Raios X (DRX). Pelas condições experimentais, concluiu-se que o biocarvão de cama de aviário se mostrou eficaz devido à alta capacidade de adsorção, pois com 9 t ha⁻¹ pode-se adsorver, aproximadamente, 0,223 mg g⁻¹ de fósforo nas condições apropriadas.

Palavras-Chave: adubação orgânica; fertilidade do solo; substrato alternativo.

ABSTRACT

Biochar is the product of the thermal treatment of biomass in a low oxygen atmosphere in a process known as pyrolysis or carbonization. This product has been used as a soil conditioner since it reduces acidity and the availability of Al, increases pH and the availability of nutrients to plants, especially phosphorus (P) and potassium (K). The aim of this study was to evaluate the process of P adsorption by clay soils incubated with different doses of biochar made from poultry litter, coconut fiber and rice straw, produced in a drum-type oven. To this end, an experiment was carried out at the Irrigation and Salinity Laboratory (ISL) of the Agricultural Engineering Department of the Federal University of Campina Grande, PB, using soil samples collected in the state of Paraíba. Different doses of biochar were incorporated into

the soil samples and incubated for a period of 160 days, keeping their humidity at around 70% of field capacity, with the addition of deionized water. After this period, these samples were used in the phosphorus adsorption study. The pH and phosphorus content of the soil after incubation with the different biochars, the parameters of the Langmuir and Freundlich P adsorption isotherms, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and X-ray diffractometry (XRD) were analyzed. Based on the experimental conditions, it was concluded that poultry litter biochar was effective due to its high adsorption capacity, as 9 t ha⁻¹ could adsorb approximately 0.223 mg g⁻¹ of phosphorus under the appropriate conditions.

Keywords: alternative substrate; soil fertility; organic fertilization.

*Graduanda do curso de Agronomia. E-mail: andrezzamaia2010@hotmail.com

**Professora orientadora. Graduada em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho. Mestrado em Agronomia (Fitopatologia) pela Universidade Federal de Lavras, doutorado pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônomicas (Proteção de Plantas) e doutorado sanduíche na University of Guelph, Canadá. Docente na Universidade Estadual da Paraíba.

1. INTRODUÇÃO

No estado da Paraíba, devido a importância econômica da avicultura e do cultivo de coco e arroz, uma considerável quantidade de resíduos são gerados, a exemplo da cama de aviário, fibra do coco e palha de arroz. Estes resíduos podem ser reciclados por compostagem ou por incorporação direta ao solo, no entanto, estas práticas podem resultar em uma rápida decomposição e liberação de nutrientes, emissões de gases de efeito estufa (CO₂) e adições anuais de material orgânico ao solo para manter a fertilidade (SEVERINO et al., 2005). Uma abordagem alternativa que pode ser mais sustentável é a conversão de resíduos em biocarvão e, em seguida, utilizá-lo como condicionador de solo (KAMARA et al., 2015).

Biocarvão é um produto sólido rico em carbono feito a partir de biomassa vegetal ou animal por meio do processo de pirólise em um ambiente com limitação de oxigênio (SINGH et al., 2010). Este produto vem sendo utilizado como condicionador de solo uma vez que reduz a acidez e a disponibilidade de Al, aumenta o pH e a disponibilidade de nutrientes às plantas, principalmente fósforo (P) e potássio (K), como também, influencia as características físico-hídricas do solo, aumentando a capacidade de campo, ponto de murcha e a água disponível (MENDES et al., 2021; CHAVES et al., 2020). O Biocarvão além de adicionar carbono ao solo também retarda o seu retorno à atmosfera sob a forma de CO₂ (TITO et al., 2021). Além disso, sugere-se que a aplicação de biocarvão pode aumentar a produtividade das culturas e a fertilidade do solo (KAPOOR et al., 2022).

As condições em que o biocarvão é produzido podem influenciar a disponibilidade de fósforo. De acordo com LEHMANN E JOSEPH (2009), a superfície específica aumenta em função da diminuição da temperatura de pirólise e dos grupos funcionais. Essas alterações podem influenciar a adsorção e conseqüentemente a disponibilidade de fósforo. Há pesquisas que indicam que a aplicação de biocarvão diminui a fixação de P no solo, resultando em maior biodisponibilidade de fosfato inorgânico (MORALES et al. 2013; DELUCA et al., 2009, MORAIS et al., 2013).

Como cada matéria-prima apresenta composição química e características de superfície própria, é esperado que diferentes biocarvões apresentem variações quanto a capacidade de adsorver fósforo (NGATIA et al., 2017, CHINTALA et al., 2014). Portanto, a extrapolação dos achados de sorção de P de um material para outro não é apropriada; como resultado da diversidade de resposta do biocarvão à sorção de P, todo material precisa ser estudado. Segundo GUARNIERI et al. (2016), a adição de biocarvão de fibra de coco promoveu maior retenção de fósforo e potássio. ALTLAND E LOCKE (2013) relataram que o biocarvão de palha de arroz gaseificada libera P e K suficientes para suprir um ciclo de produção de seis semanas de gerânio, mas não possui a concentração correta ou o equilíbrio de micronutrientes para um crescimento saudável. Conforme FERNANDES et al. (2022) o biocarvão de cama de aviário não foi um bom adsorvente de fósforo, ao contrário, liberou P para a solução de equilíbrio.

No entanto, pouco se sabe sobre a adsorção e/ou disponibilidade de P após a aplicação dos biocarvões de fibra de coco, de palha de arroz e de cama de aviário. Assim, como uma hipótese, acredita-se que os biocarvões, principalmente devido ao aumento do pH do solo, reduzem a adsorção de P, aumentando sua disponibilidade. Para conhecer este comportamento, antes dos estudos de adsorção é necessário incubar, por um determinado período, os biocarvões em solo e após este período

avaliar os efeitos no solo, uma vez que as características dos biocarvões dependem do tipo e das condições de produção.

A adsorção de fósforo pode ser investigada usando isothermas lineares e não lineares (ZHANG et al., 2016). Normalmente os modelos de Langmuir e de Freundlich são úteis para descrever isothermas de adsorção e fornecem fatores eficazes na previsão das características de adsorção de nutrientes. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de adsorção de P pelo argissolo incubado com diferentes doses dos biocarvões provenientes de cama de aviário, fibra de coco e de palha de arroz, produzidos em forno do tipo “tambor”.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado no Laboratório de Irrigação e Salinidade (ISL) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, PB, utilizando amostras de solo coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade no Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), Campus II da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Lagoa Seca, Paraíba, Brasil. Estas amostras foram caracterizadas quimicamente segundo Teixeira et al. (2017) e apresentaram os seguintes resultados: pH (H₂O) = 6,44; Ca = 2,7 cmol_c kg⁻¹; Mg = 1,41 cmol_c kg⁻¹; Na = 0,061 cmol_c kg⁻¹; K = 0,28 cmol_c kg⁻¹; H+Al = 1,07 cmol_c kg⁻¹; matéria orgânica = 18,71 g kg⁻¹; P = 14,5 mg kg⁻¹ e CTC = 5,52 cmol_c kg⁻¹. A densidade aparente do solo é 1,3 kg dm⁻³.

2.2 Preparo e caracterização dos biocarvões

A cama de aviário utilizada no preparo do biocarvão foi coletada no setor de avicultura do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), Campus II da UEPB, a fibra de coco foi coletada numa produção agrícola no litoral, na cidade de Conde, PB e a palha de arroz foi coletada numa produção agrícola no sertão, na cidade de Souza, PB.

O biocarvão foi produzido neste mesmo centro utilizando forno artesanal do tipo “tambor duplo” (Figura 1A) (Guerra, 2014). Para o processo de pirólise lenta, a temperatura se manteve em torno de 492,5°C, utilizou-se recipientes de ferro de 20 L onde foram acomodados a cama de aviário (Figura 1B), termômetro para acompanhar a variação da temperatura no interior do forno (Figura 1C) e lenha de sabiá para a queima.



Figura 1. Forno do tipo “tambor duplo” (A), recipiente de 20L (B) e termômetro (C).

As amostras dos biocarvões foram caracterizadas quimicamente, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos dos diferentes biocarvões

Atributos	Biocarvão		
	Cama de aviário	Fibra de coco	Palha de arroz
Nitrogênio Total, %	0,39	0,50	0,65
Fósforo Total (P ₂ O ₅), %	2,57	0,33	0,72
Potássio Total (K ₂ O), %	1,88	3,20	0,87
Calcio, %	7,31	0,52	0,29
Magnésio, %	0,56	0,35	0,23
Enxofre, %	0,28	0,31	0,17
Boro, %	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Zinco, %	0,02	< 0,01	< 0,01
Cobre, %	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Manganês, %	0,04	< 0,01	0,03
Ferro, %	0,44	0,22	0,21
Umidade, %	1,57	3,22	3,57
Carbono Orgânico, %	12,28	59,26	35,34
Razão Carbono/Nitrogênio	31,49	118,52	54,37
pH	12	9,45	7,66

2.3 Influência dos biocarvões na fertilidade do solo

Para avaliar o efeito dos biocarvões na adsorção de fósforo foi utilizado o método de incubação, colocando amostras de solo (1,0 kg) em sacos plásticos (parcelas experimentais), misturados ao biocarvão de acordo com os tratamentos (0, 1,15; 2,30; 3,45 e 4,60g correspondentes a: 0,0; 3,0; 6,0; 9,0 e 12,0 t ha⁻¹, respectivamente) e incubados por 160 dias, mantendo sua umidade em torno de 70% da capacidade de campo, com adição de água deionizada.

Com o objetivo de promover a liberação de fósforo pelos biocarvões e a neutralização da acidez do solo, doses crescentes de biocarvão foram incorporadas às amostras de solo e incubadas por um período de 160 dias, mantendo sua umidade em torno de 70% da capacidade de campo com adição de água deionizada. Após esse período, essas amostras foram utilizadas no estudo de adsorção de fósforo.

2.4 Delineamento experimental

Este estudo foi conduzido utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em três repetições, com um arranjo fatorial 3X5X3 representado pelos seguintes fatores: três tipos de biocarvão (cama de aviário, fibra de coco e palha de arroz), 5 doses (0,0; 3,0; 6,0; 9,0 e 12,0 t ha⁻¹) e três repetições, totalizando 45 unidades experimentais.

2.5 Variáveis analisadas

O fósforo remanescente (Prem) foi determinado agitando uma solução de 60 mg L⁻¹ de P em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ a 120 rpm, durante uma hora, na proporção solo: solução de 1:10 (ALVAREZ, 2017). Após agitação, as fases sólida e líquida foram separadas e a concentração de P foi determinada na solução de equilíbrio, utilizando o método do ácido ascórbico, modificado por BRAGA E DEFELIPO (1972). As doses para determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) foram calculadas com base no teor de Prem e variaram de 0 a 60 mg L⁻¹ (ALVAREZ, 2017). Após 24 horas de agitação, as amostras foram filtradas e o fósforo na solução de equilíbrio foi quantificado por colorimetria (ALVAREZ et al., 2017). Para descrever o fenômeno de adsorção de P foram utilizadas as equações de Langmuir (Equação 1) e Freundlich (Equação 2).

$$q_e = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad \text{Eq. 1}$$

$$q_e = K_f C^{1/n} \quad \text{Eq.2}$$

onde: q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g⁻¹), C é a concentração de adsorbato no equilíbrio (mg L⁻¹), q_m corresponde à capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹), $1/n$ é a constante relacionada à heterogeneidade da superfície, e K_L e K_f são as constantes de energia de adsorção de Langmuir (L mg⁻¹) e a constante de capacidade de adsorção de Freundlich (L mg⁻¹), respectivamente.

A espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos biocarvões foi realizada no espectrofotômetro Perkin Elmer FTIR, série Spectrum 400, com o software Perkin Elmer, sendo conduzida no infravermelho médio. As amostras dos biocarvões foram preparadas em pastilhas de brometo de potássio (KBr), sendo as mesmas maceradas para facilitar a preparação dos pellets e para uma melhor interação do feixe de infravermelho com as amostras, obtendo assim uma faixa de comprimento de onda ótima e resultados mais confiáveis. Da mesma forma, foi realizada análise de difração de raios-X das amostras de biocarvões à temperatura ambiente em um aparelho Shimadzu XRD-7000, utilizando radiação de cobre K- α (1,5418 Å), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. Os biocarvões foram examinados em um intervalo de 2θ entre 10 e 80,0 graus a uma velocidade de 1° min⁻¹.

Os atributos químicos do solo: pH e concentração de fósforo, após período de incubação, foram analisados através de regressão polinomial para doses e comparação de médias pelo teste de Tukey para tipos de biocarvão. Os parâmetros

das isotermas de adsorção de Langmuir e de Freundlich também foram submetidos a análise de variância, aplicando-se o teste de Tukey para comparação das médias provenientes da interação doses x biocarvões. Aplicou-se ainda, contrastes ortogonais entre o tratamento controle (sem aplicação de biocarvão) *versus* demais tratamento. Para efeito de normalidade, os dados da constante KF de Freundlich foram transformados em $1/\sqrt{x}$, porém, para facilitar a compreensão, o gráfico foi elaborado com os dados originais. O software estatístico utilizado neste trabalho foi o SISVAR 5.4 (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. pH e teor de fósforo do solo após incubação com diferentes biocarvões

Após 160 dias de incubação das amostras de solo com os três diferentes biocarvões, observou-se através das análises desses materiais, que as doses crescentes do biocarvão de cama de aviário aumentaram os valores de pH das amostras de solo, variando de 6,30 (controle) a 7,32 (maior dose) (Figura 1A) corroborando com MENDES et al. (2021). Estes autores também encontraram aumento significativo do pH do solo incubado com doses crescentes do biocarvão de cama de aviário.

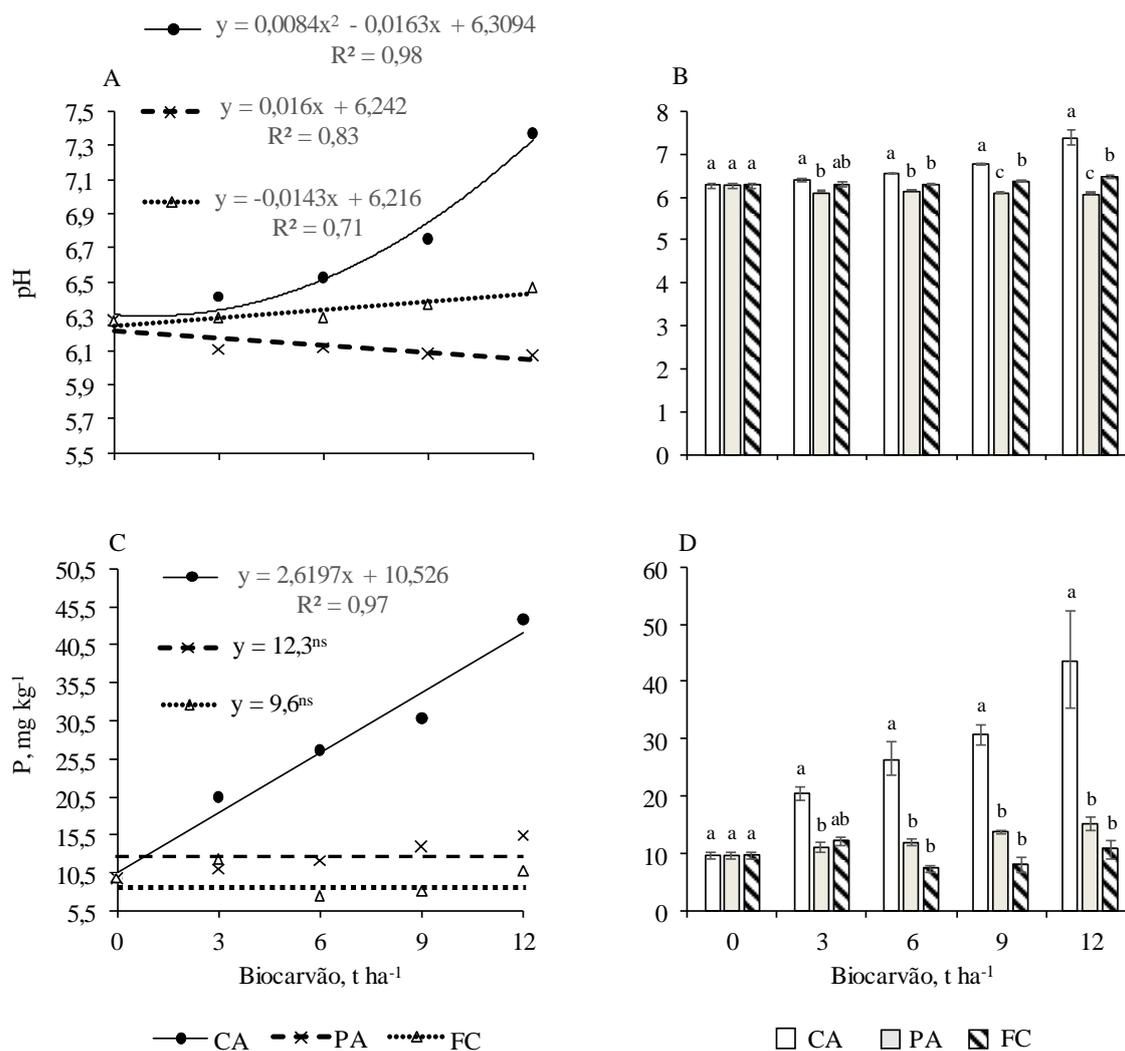


Figura 1. Valores de pH (A e B) e fósforo (C e D) do solo, após período de incubação (160 dias) para os tratamentos com biocarvões de cama de aviário (CA), palha de arroz (PA) e fibra de coco (FC).

Ainda com relação a Figura 1A, o pH do solo incubado com biocarvão de fibra de coco aumentou a uma taxa de 0,016 unidades a cada tonelada aplicado de biocarvão por hectare. Ao contrário, as doses crescentes de biocarvão de palha de arroz aplicadas ao solo, diminuíram o valor do pH do solo. Isto, provavelmente, porque na composição do biocarvão de palha de arroz são baixas as porcentagens de cálcio e magnésio, os quais cátions são importantes para remover o alumínio do complexo de troca neutralizando o mesmo (Sparks, 2003). No entanto, no solo incubado, não apresentava alumínio disponível, por isso, a incubação desse biocarvão reagiu com o solo de forma diferente, diminuindo o pH das amostras de solo. Quanto ao efeito de biocarvão dentro de cada dose aplicada (Figura 1B), percebe-se que o biocarvão de cama de aviário foi o que apresentou o maior efeito de calagem, diferindo o valor do pH do solo quando comparado ao que recebeu palha de arroz a partir da dose de 3 t ha⁻¹. Para as demais doses, independentemente do biocarvão aplicado, o pH do solo incubado com biocarvão de cama de aviário foi estatisticamente superior.

De forma semelhante, as doses crescentes de biocarvão de cama de aviário aumentaram os teores de fósforo nas amostras de solo incubadas (Figura 1C), corroborando com MENDES et al. (2021). A aplicação da maior dose deste biocarvão promoveu, quando comparada ao tratamento controle, um aumento no teor de fósforo do solo em 298,6%. Este aumento significativo deve-se, provavelmente, a concentração de fósforo presente no biocarvão de cama de aviário (2,57%) e a presença de compostos fosfatados, cuja discussão será apresentada no tópico da análise de difração de raios X (DRX). Ainda com relação a Figura 1C, os teores de P não foram influenciadas significativamente pelas doses dos biocarvões de fibra de coco e palha de arroz, cujas médias corresponderam a 9,6 e 12,3 mg kg⁻¹, respectivamente. O baixo teor de fósforo presente em tais biocarvões, 0,33 e 0,72 %, respectivamente, é um dos motivos para tal comportamento. Comparando o teor de fósforo entre os três biocarvões dentro da mesma dose (Figura 1D), observa-se que os biocarvões de cama de aviário e de fibra de coco não diferiram entre si aplicando-se 3 t ha⁻¹, contudo, nas demais doses, os maiores teores de P foram verificados no solo que recebeu o biocarvão de cama de aviário. Os biocarvões de palha de arroz e fibra de coco não diferiram entre si, quanto ao teor de fósforo, independentemente da dose aplicada.

3.2. Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção (Figura 2), correspondentes às amostras de solo incubadas com as doses de 6, 9 e 12 t ha⁻¹ de biocarvões de cama de aviário, fibra de coco e palha de arroz, demonstraram que as quantidades de fósforo adsorvidas pelas amostras de solo aumentaram com a concentração da solução de equilíbrio. No entanto, a maior inclinação da curva (Figura 2B), correspondente à amostra de solo incubada com 9 t ha⁻¹ de biocarvão de cama de aviário indicou a maior afinidade do fosfato pelos sítios de adsorção dessa amostra. Isto fez com que a quantidade de fósforo adicionada, principalmente nas baixas concentrações, fosse quase toda adsorvida, permanecendo na solução de equilíbrio baixas concentrações do elemento. Com as doses 6 e 12 t ha⁻¹ dos biocarvões, as inclinações das isotermas mostraram um comportamento semelhantes em relação a adsorção do fósforo nas amostras de solo incubadas com os três biocarvões.

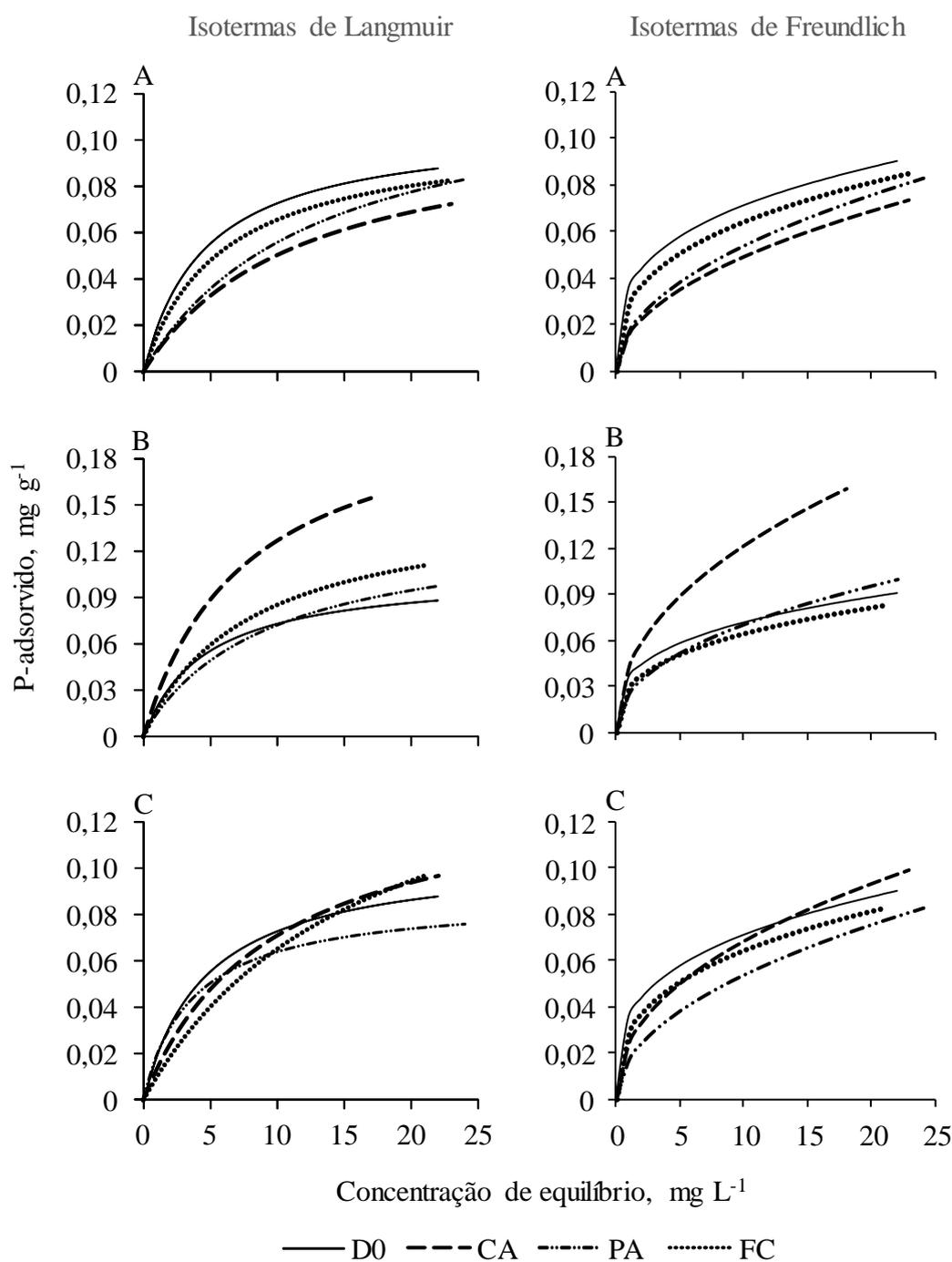


Figure 2. Isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para as doses de fósforo estudadas em um solo na ausência (D0) e incubado com os biocarvões de cama de aviário (CA), palha de arroz (PA) e fibra de coco (FC) nas doses de 6 (A), 9 (B) e 12 t ha⁻¹ (C).

Os parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich para as amostras de solo estudadas em função das doses crescentes dos três tipos de biocarvão são mostrados na Tabela 2. Estes resultados variaram tanto com o tipo de biocarvão utilizado, quanto com as doses que foram aplicadas ao solo.

Tabela 2. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo Langmuir e Freundlich com a aplicação de biocarvões e diferentes doses. (SQE = Soma dos quadrados dos erros).

Biocarvão	Aplicação de biocarvão t ha ⁻¹	Parâmetros da isoterma de Langmuir				Parâmetros da isoterma de Freundlich			
		q _m mg g ⁻¹	K _L L mg ⁻¹	R ²	SQE	K _f L mg ⁻¹	n	R ²	SQE
	0	0,106	0,218	0,984	0,0001	0,000015	3,326	0,976	0,001
Cama de Aviário	6	0,109	0,086	0,988	4,4E ⁻⁵	0,00019	2,084	0,994	0,00002
	9	0,223	0,131	0,784	0,004	0,0009	2,233	0,748	0,00459
	12	0,139	0,105	0,964	0,0002	0,00024	2,252	0,946	0,00035
Palha de Arroz	6	0,127	0,078	0,890	0,0006	0,00025	2,054	0,869	0,00066
	9	0,139	0,109	0,812	0,001	0,00023	2,286	0,801	0,00136
	12	0,088	0,270	0,971	0,0001	0,000002	3,912	0,968	0,00013
Fibra de Coco	6	0,104	0,174	0,973	0,0001	0,000028	2,975	0,967	0,00016
	9	0,152	0,128	0,935	0,001	0,000257	2,394	0,920	0,0007
	12	0,172	0,060	0,977	0,0001	0,00082	1,745	0,982	0,00011

q_m; K_L; K_F; n; R² e SQE. Capacidade máxima de adsorção; Energia de ligação soluto-adsorvente; Coeficiente de adsorção; Estimativa do parâmetro de ajuste (adimensional); Coeficiente de determinação e Soma dos quadrados dos erros, respectivamente.

Com base na análise dos coeficientes de determinação (R²) e da soma dos quadrados dos erros (SQE) verifica-se, com exceção das doses 6 e 12 t ha⁻¹ com aplicação dos biocarvões de cama de aviário e fibra de coco, respectivamente, um melhor ajuste dos dados isotérmicos ao modelo de Langmuir (Tabela 2), isto porque, apresentaram maiores valores de R² e menores SQE quando comparados aos obtidos com o modelo de Freundlich. Tal resultado indica predominância de adsorção em monocamada, característica do modelo de Langmuir.

A utilização desta técnica possibilita melhorar a recomendação da adubação fosfatada, e constitui uma informação relevante para a interpretação da disponibilidade de P nos solos, por estimar o caráter sortivo dos mesmos. A capacidade máxima de adsorção de fosfato do solo (CMAP), fornece uma indicação da quantidade de minerais presentes no solo, que são saturados de P e, também da afinidade desses minerais pelo elemento (Corrêa et al., 2011).

A capacidade máxima de adsorção (q_m) variou em função dos biocarvões e das doses aplicadas (Tabela 2). Observa-se na Figura 3A, que a maior capacidade máxima de adsorção foi obtida aplicando-se 9 t ha⁻¹ de biocarvão de cama de aviário, cuja média correspondeu a 0,223 mg g⁻¹, valor este 110,37% maior quando comparado ao tratamento controle (0 t ha⁻¹). A q_m não variou entre os biocarvões com a aplicação de 6 t ha⁻¹, como também não houve diferença significativa entre doses com o uso do biocarvão de palha de arroz.

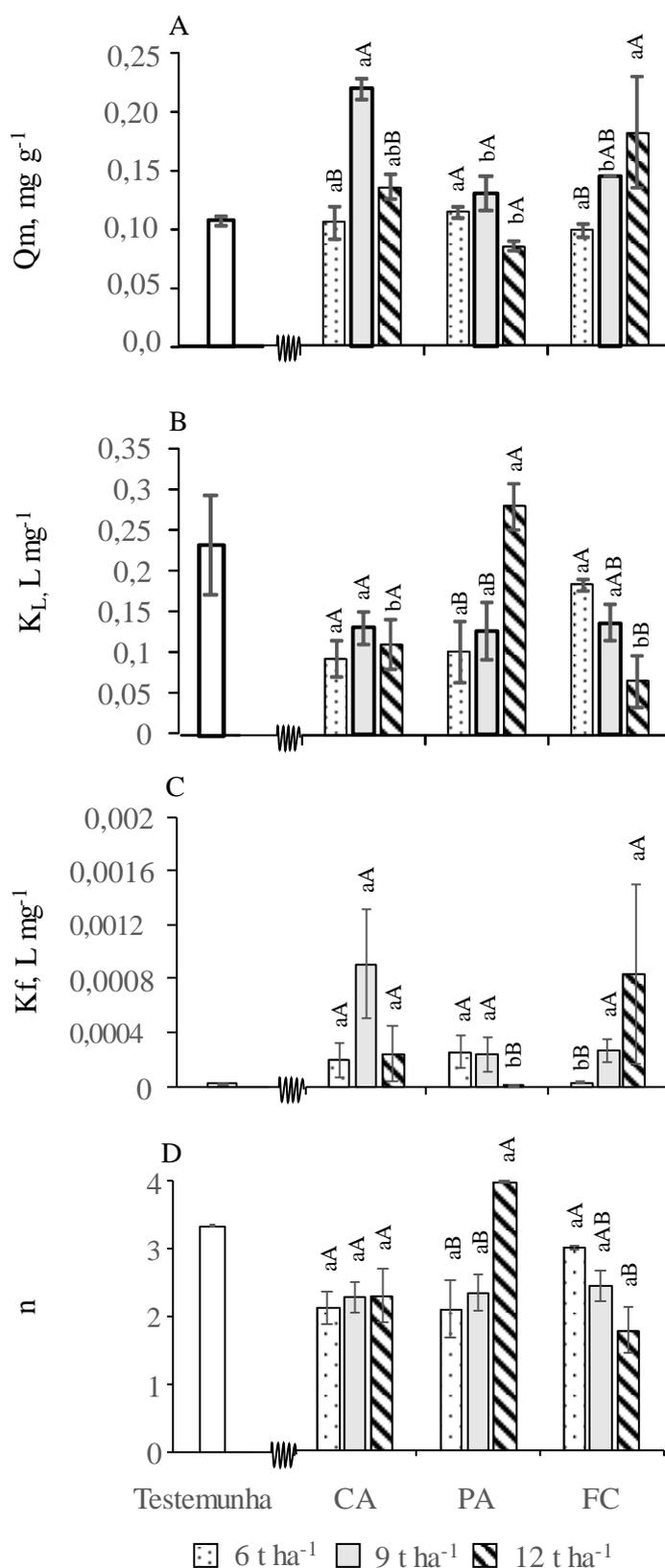


Figura 3. Parâmetros das isothermas de Langmuir e Freundlich obtidos em função da aplicação dos biocarvões de cama de aviário (CA), palha de arroz (PA) e fibra de coco (FC) e das doses 6, 9 e 12 t ha⁻¹. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si para o desdobramento de biocarvões dentro de doses e médias

seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si para o desdobramento de doses dentro de biocarvões. Barras verticais representam o erro padrão.

q_m ; KL; KF e n. Capacidade máxima de adsorção; Energia de ligação soluto-adsorvente; Coeficiente de adsorção e Estimativa do parâmetro de ajuste (adimensional).

Ainda com relação a figura 3A, apenas o biocarvão de fibra de coco promoveu aumento na q_m em função das doses aplicadas, contudo, sem diferir as doses 9 e 12 t ha⁻¹. Variações na capacidade máxima de adsorção de fósforo também foram observadas por WU et al. (2022), cuja explicação para tal comportamento foram: 1) o carbono liberado pelo biocarvão diminui a adsorção de P por competir pelos sítios de adsorção na superfície dos minerais do solo; 2) A elevação do pH do solo após adição do biocarvão, aumenta as cargas negativas na superfície das partículas do solo e conseqüentemente, diminuição na adsorção de P por atração eletrostática; 3) biocarvão tem uma forte capacidade de adsorção de P, aumentando a sua eficiência de adsorção em função da dose aplicada (SHEPHERD et al., 2017).

A constante de Langmuir (KL) está relacionada à energia de ligação soluto-superfície adsorvente (Referência). No presente estudo, não houve diferença significativa entre os biocarvões aplicando-se 6 e 9 t ha⁻¹, contudo, mesmo comportamento não foi observado com a aplicação de 12 t ha⁻¹, sendo o biocarvão de palha de arroz o que promoveu a maior média de KL (Figura 3B). Ainda com relação a esta figura, a constante KL variou entre doses apenas com os biocarvões de palha de arroz e fibra de coco, sendo que neste último, as maiores médias foram obtidas nas doses de 6 e 9 t ha⁻¹.

Com relação aos parâmetros de Freundlich, comparando os biocarvões entre si dentro da mesma dose, constata-se que os biocarvões de palha de arroz e de fibra de coco com a aplicação de 12 e 6 t ha⁻¹, respectivamente, apresentaram os menores valores da constante Kf, enquanto que as maiores médias foram observadas com as doses 9 e 12 t ha⁻¹ dos biocarvões de cama de aviário e fibra de coco, respectivamente (Figura 3C). Apenas o biocarvão de palha de arroz na maior dosagem apresentou valor de Kf inferior quando comparado ao controle, tal resultado sugere que nos demais tratamentos, a adsorção em multicamadas foi favorecida. O parâmetro KF é uma medida aproximada da capacidade de adsorção do adsorvente, portanto, quanto maior seu valor, maior é a capacidade de adsorção (McKay, 1996; Arias et al., 2006; Lázaro et al., 2008). Porém, estes valores são baixos se comparados com os encontrados por FERNANDES (2022) que ao trabalhar com biocarvão de cama de aviário pirolisado a 350 °C, com aplicação de 12,4 t ha⁻¹, obteve o valor de 0,002 L mg⁻¹ da constante Kf.

O coeficiente “n” de Freundlich está relacionado à intensidade de adsorção, havendo uma relação qualitativa entre o parâmetro n e a distribuição dos sítios de adsorção (Luo et al. 2016). Uma adsorção favorável produz um valor de n entre 1 e 10. Sendo assim, quanto maior o valor de n mais forte a interação entre o adsorvato e adsorvente, pois 1/n é mínimo (LEANDRO-SILVA et al., 2020). No presente estudo, os valores de n variaram entre 1 e 4 indicando que o processo de adsorção foi favorável (Tabela 2). A maior média do coeficiente n foi verificada com a aplicação de 12 t ha⁻¹ de biocarvão de palha de arroz, cujo aumento, em relação ao controle, correspondeu a 17,6% (Figura 3D). Nos demais tratamentos, os valores de n não diferiram entre as doses para o biocarvão de cama de aviário e para o biocarvão de fibra de coco, as doses 6 e

9 t ha⁻¹ não diferiram entre si, sendo que esta última também não diferiu da dose 12 t ha⁻¹.

Conforme as análises de variância, Tabela 3, os tratamentos influenciaram de forma significativa na capacidade máxima de adsorção de fósforo, nas constantes de energia de ligação dos dois modelos utilizados, Langmuir e Freundlich, e nos valores de N. Nesta mesma tabela também é apresentada o contraste entre o tratamento controle (0 t ha⁻¹) *versus* os demais tratamentos, ou seja, biocarvões nas dosagens 6, 9 e 12 t ha⁻¹.

Tabela 3 - Resumos das análises de variância dos contrastes para os parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio			
		QMAX	KL	KF ⁽¹⁾	N
Tratamento	9	0,0036**	0,0087*	64350,30**	0,893**
Resíduo	10	0,0006	0,0020	1729,30	0,135
B1D6 vs D0	1	0,000002 ^{ns}	0,0183*	188742,0**	2,91**
B1D9 vs D0	1	0,014209**	0,0094 ^{ns}	239803,6**	2,73**
B1D12 vs D0	1	0,001050 ^{ns}	0,0139*	198138,9**	2,36**
B2D6 vs D0	1	0,000112 ^{ns}	0,0160*	181888,1**	2,41**
B2D9 vs D0	1	0,000759 ^{ns}	0,0103*	195337,9**	2,15**
B2D12 vs D0	1	0,000369 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	3116,5 ^{ns}	0,08 ^{ns}
B3D6 vs D0	1	0,000025 ^{ns}	0,0019 ^{ns}	89183,4**	0,60 ^{ns}
B3D9 vs D0	1	0,001735 ^{ns}	0,0083 ^{ns}	203613,0**	1,90**
B3D12 vs D0	1	0,006585**	0,0264**	233394,3**	4,35**
CV (%)		18,09	31,27	24,44	24,44

D0, B1, B2, B3 Tratamento controle e biocarvões de cama de aviário, palha de arroz e fibra de coco, respectivamente. **significativo (p<0,01), *significativo (p<0,05), ^{ns}não significativo (p>0,05). ⁽¹⁾Dados transformados 1/√x.

Com relação a capacidade máxima de adsorção, apenas os biocarvões cama de aviário (CA) e fibra de coco (FC) nas doses 9 e 12 t ha⁻¹ apresentaram médias estatisticamente superiores ao controle (Tabela 3). Este resultado é interessante do ponto de vista agrônomo uma vez que, aumentando a dose do biocarvão de CA, a concentração de fósforo no solo aumenta (Figura 1C) sem que este esteja necessariamente adsorvido. FERNANDES et al. (2022), avaliando a adsorção de fósforo em solo incubado com biocarvão de cama de aviário, verificaram uma diminuição na Q_m em função das doses aplicadas, cuja liberação superou a adsorção nas maiores doses.

A diminuição na adsorção de P pode estar relacionada ao aumento do pH do solo após a aplicação de biocarvão, corroborando CUI et al. (2011). No tratamento controle o pH do solo foi de 6,30, mas seu valor aumentou proporcionalmente com o uso de biochar, atingindo seu maior valor 7,32 com a utilização de 12 t ha⁻¹. O argissolo utilizado neste estudo, por ser muito lixiviado, tem suas cargas elétricas dependente do pH, portanto o aumento deste atributo com o uso de biocarvão aumentou o teor de carga líquida negativa no solo e conseqüentemente diminuiu a adsorção de fósforo.

De acordo com WEI et al. (2013), o P lábil aumenta proporcionalmente com a acidez do solo. Quando o pH do solo aumenta em resposta à adição de biocarvão, o aumento da carga negativa do mineral superfície do solo favorece a diminuição da adsorção de P (MURPHY; STEVENS, 2010). Como um conseqüentemente, há um

aumento na disponibilidade de fósforo no solo (CUI et al., 2011). Isto ocorre quando as atividades de Ca e Mg são baixas o suficiente para evitar a precipitação de Ca/Mg-P (QIAN et al., 2013).

O tratamento controle apresentou valor de energia de ligação de Langmuir (KL) estatisticamente semelhante aos biocarvões de cama de aviário (9 t ha⁻¹), palha de arroz (12 t ha⁻¹) e fibra de coco (6 e 9 t ha⁻¹) (Tabela 3). Nos demais tratamentos, quando comparados ao controle, houve uma diminuição na constante KL, indicando que apesar de ter ocorrido adsorção, ela está mais relacionada com a Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CPMA) do que com a “KL”, por esta razão que CMAP, isoladamente, tem sido utilizada com sucesso como padrão de recomendação da adubação fosfatada (FALCÃO; SILVA, 2004). Valores maiores de “KL” são esperados em materiais mais argilosos, como constatado por OLIVEIRA et al. (2014), em seu trabalho com um Latossolo Bruno, a textura do solo foi alterada pela adição de diferentes quantidades de areia a este mesmo solo, e obtiveram menor valor de “KL” quanto maior a quantidade de areia adicionada. Estes mesmos autores questionaram a viabilidade do modelo de linearização de região única para obtenção do “KL”, considerando que a adsorção de P se dá em 3 estádios com energia de ligação distintas, porém concluíram que os valores de “KL” foram mais coerentes relacionados com o modelo de linearização de região única.

Com relação a constante de capacidade de adsorção de Freundlich (Kf), o valor observado no controle não diferiu estatisticamente do tratamento biocarvão de palha de arroz com 12 t ha⁻¹. Mesmo comportamento não foi verificado nos demais tratamentos, cujas médias superaram o controle (Tabela 3). Ainda com base nesta tabela, não houve diferença na intensidade de adsorção “n” entre os tratamentos controle e os biocarvões de palha de arroz e fibra de coco nas dosagens 12 e 6 t ha⁻¹, respectivamente, indicando que nestes casos a adsorção foi menos favorável. Nos demais tratamentos a constante “n” foi maior do que 1, indicando que a adsorção é favorável. Portanto, observa-se que a capacidade de adsorção (Kf) e o Freundlich constante (n) foram maiores no tratamento com ausência de biochar, 0,017 e 3,614, respectivamente. De acordo com KIM et al. (2018), n valores entre 1 e 10 indicam que a adsorção foi eficaz e, à medida que o valor Kf aumenta, a afinidade do adsorver para o adsorvente aumenta. Esses resultados demonstram que o Argissolo utilizado neste estudo, quando incubado, tem um sítio de sorção menor para P. MAHADEVAN et al. (2018) relataram que os valores de n variou de 0,7 a 2,5 para remoção de P pelo sistema bentonita-alúmen. Segundo NOVAIS et al. (2018), os valores de n variaram de 1 a 3 para adsorção de P em biocarvão de cama de frango e bagaço da cana-de-açúcar.

3.3. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia infravermelha por transformação de Fourier (FTIR) de todas as biomassas foi conduzida na faixa de 4.000 a 500 cm⁻¹. A espectroscopia FTIR fornece informações sobre os grupos funcionais existentes na estrutura das biomassas (Figura 4).

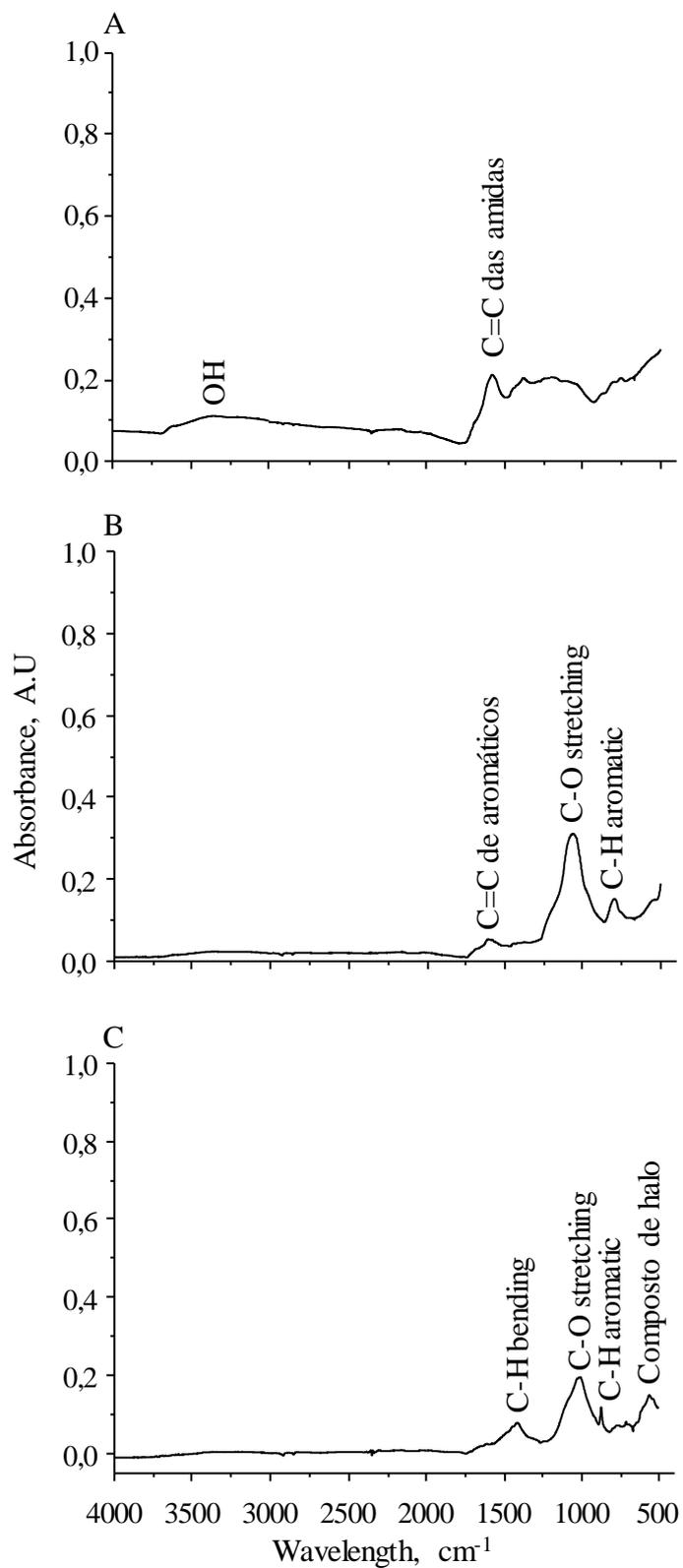


Figura 4. FTIR Fibra de coco (A), palha de arroz (B) e cama de aviário (C).

Observou-se no biocarvão de fibra de coco (Figura 4A) uma banda em ≈ 3300 cm⁻¹ atribuído a vibrações de (O-H) em grupo hidroxila presente na celulose. A

posição e o formato desta banda sugerem que o grupo hidroxila está envolvido nas ligações de hidrogênio. Segundo FU et al. (2017), a água remanescente na biomassa poderia participar na formação de ligações de hidrogênio.

A banda em $\approx 1630 \text{ cm}^{-1}$, no biocarvão de palha de arroz (Figura 4B), foi atribuído a ligações C=C de anéis aromáticos (FERREIRA et al., 2018). Também observou-se para os biocarvões de palha de arroz e cama de aviário (Figuras 4B e 4C), uma região de hemicelulose e celulose entre 1200 e 1100 cm^{-1} atingindo seu valor máximo em 1020 cm^{-1} devido ao estiramento de C-O (HENRIQUE et al., 2013), perfil químico e estrutural de biomassas lignocelulósicas (CHEN et al., 2020).

Ainda com relação aos biocarvões de palha de arroz e cama de aviário (Figuras 4B e 4C), verificou-se a presença de bandas na região compreendida entre 1000 - 625 cm^{-1} , que são posições compatíveis com vibrações (C-H) em estruturas aromáticas (Zhao et al., 2022). A presença dos grupos funcionais apresentadas na Figura 4 das biomassas utilizadas neste estudo corroboram diversos autores que trabalharam com fibra de coco, palha de arroz e cama de aviário, a exemplo de FU et al., (2017); ZHANG et al., (2016); CHEN et al. (2020); FERNANDES et al., (2022a).

A presença de grupos funcionais oxigenados nos biocarvões analisados pode influenciar a adsorção de fósforo (MAHMOUD et al., 2020). Isto porque, em pH ácido, tais grupos podem apresentar carga positiva facilitando a adsorção de íons PO_4^{3-} e, em pH alcalino, há uma diminuição na precipitação de P-Fe e P-Al de baixa solubilidade, como também, geração de cargas negativas pela desprotonação de hidroxilas expostas nas argilas e matéria orgânica, ocorrendo repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente (McBRIDE, 1994). Assim, o manejo a que o solo é submetido, alterando os fatores envolvidos no processo, pode reduzir a adsorção de P no solo, aumentando a sua disponibilidade às plantas.

O solo incubado com biocarvão de fibra de coco foi o único que apresentou aumento na capacidade de adsorção de fósforo em função das doses aplicadas (Figura 3A). A presença do grupo O-H em sua superfície pode ter contribuído para a maior adsorção. Tais resultados corroboram NARDIS et al. (2020), que verificaram adsorção de P em bandas de -OH. FENG et al. (2021), após o processo de adsorção, também detectaram ligações entre os íons H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} com o grupo funcional C-O.

A presença dos grupos funcionais C-O e C-H nos biocarvões de palha de arroz e cama de aviário sugere que os mesmos apresentam maior aromaticidade quando comparados ao biocarvão de fibra de coco. A presença de ligações do tipo C=C de anéis aromáticos também evidencia a aromatização do biocarvão de palha de arroz (FERREIRA et al., 2018). Estudos anteriores sugerem que grupos funcionais aromáticos podem interagir com os grupos hidroxila na superfície de minerais metálicos no solo (YANG et al., 2021), ocupando os locais que são originalmente para adsorção de íons fosfato. Portanto, a diminuição na capacidade máxima de adsorção de P observada com a maior dose (12 t ha^{-1}) de BPA (Figura 3A) pode ser consequência da maior aromaticidade do solo causada pela adição deste biocarvão, levando à liberação de P da superfície do mineral Fe/Al, tais resultados corroboram WU et al. (2022).

3.4. Difractometria de Raios X (DRX)

Para a biomassa de fibra de coco (Figura 5A) verificou-se a presença de componentes inorgânicos com os elementos potássio e fósforo em sua constituição, como cloreto de potássio (KCl), fosfato de alumínio (AlPO_4), sulfeto de silício (SiS_2) e dióxido de Silício (SiO_2). Quanto a palha de arroz (Figura 5B), o biocarvão apresentou um plano cristalino microcristalino de grafite de celulose, composto considerado amorfo, o qual possui pouca pureza e cristalinidade (FERREIRA, 2008).

De acordo com a difração de raios X, o biocarvão de cama de aviário (Figura 5C) apresentou em sua constituição picos característicos de fosfato de alumínio (AlPO_4), sulfeto de silício (SiS_2), dióxido de Silício (SiO_2) e calcita (CaCO_3). A detecção deste último composto reforça a natureza alcalina do biocarvão proveniente da cama de aviário. Além do mais, a calcita é um dos principais locais de adsorção de P em biocarvões (ZHANG et al., 2016).

A detecção de fosfato de alumínio (AlPO_4) justifica a maior concentração de fósforo no solo após o período de incubação, principalmente com a cama de aviário (Figura 1B). O considerável teor de fósforo contido na cama de aviário é justificada, em parte, pela ração fornecida às aves, que contem em sua constituição: farelo de milho e soja, fosfato dicálcico e o núcleo que fornece fósforo (P), cálcio (Ca), sódio (Na), entre outros. Além do mais, a concentração desses ingredientes varia de acordo com o estágio de desenvolvimento dos frangos, com teor de cálcio próximo a 1% durante a permanência das galinhas no aviário e o teor de fósforo entre 0,48 e 0,44% nos dois primeiros estágios, diminuindo para 0,37% na fase de terminação (FERNANDES et al., 2022).

É importante destacar que o fósforo contido no biocarvão de cama de aviário, caso esteja disponível para solução do solo, poderá influenciar no processo de adsorção deste elemento, isto porque, Fernandes et al. (2022b) verificaram uma diminuição da adsorção, proporcionalmente devido à aplicação de biocarvão, cuja concentração liberada ultrapassou a adsorvida, incubando o solo com 37,2, 49,6 e 62,0 t ha⁻¹ de biocarvão de cama de aviário.

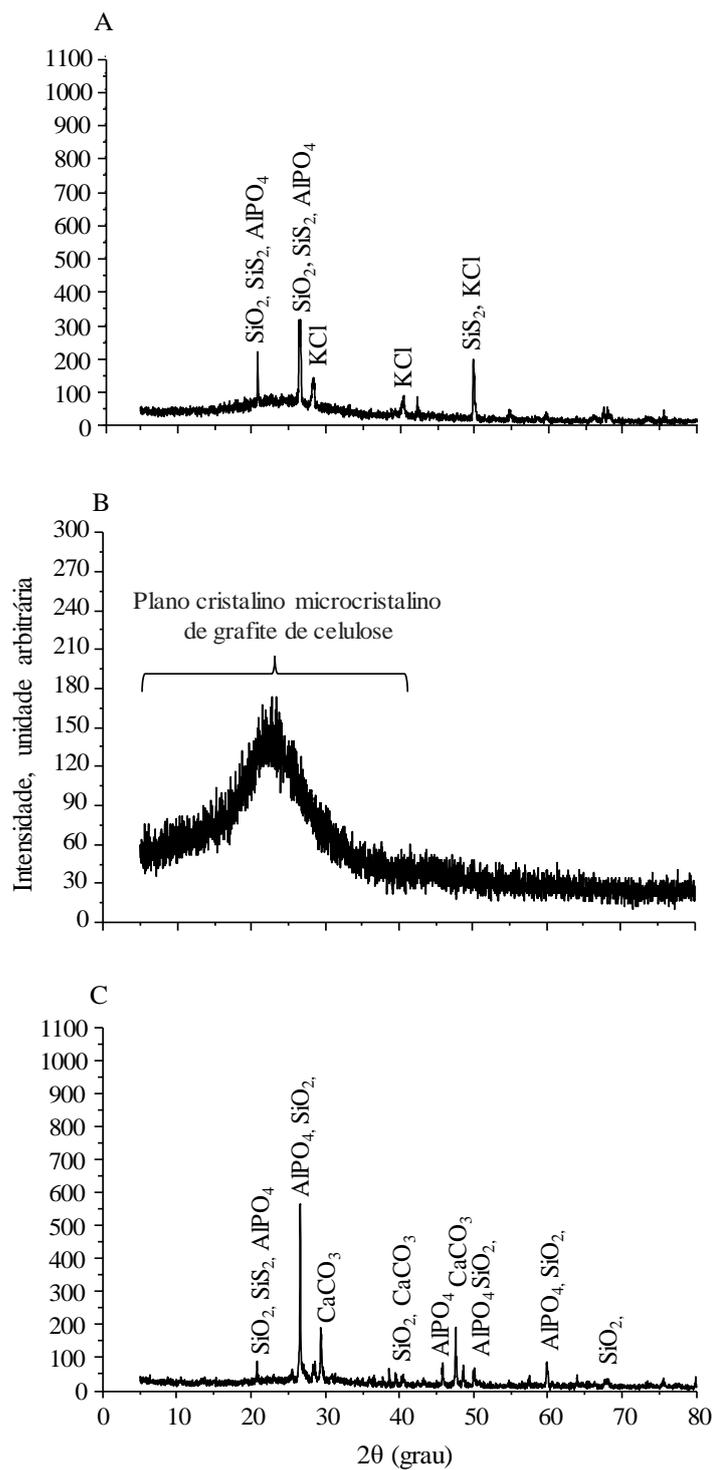


Figura 5. DRX Fibra de coco (A), palha de arroz (B) e cama de aviário (C).

4. CONCLUSÕES

A adsorção em monocamada confirmada pelo modelo de Langmuir, foi a que melhor se ajustou ao comportamento do sistema de adsorção do íon fósforo. Mediante o interesse em adquirir um material alternativo que seja de baixo custo, abundante, renovável e que possua potencial condicionador de solo contendo fósforo, o biocarvão de cama de aviário se mostrou eficaz devido à alta capacidade de adsorção, pois com 9 t ha^{-1} pode-se adsorver, aproximadamente, $0,223 \text{ mg g}^{-1}$ de fósforo nas condições apropriadas. Portanto, o estudo concluiu que, em solos intemperizados com baixo teor de P, o biocarvão de cama de aviário pode ser usado como fertilizante e como condicionador do solo, aumentando a disponibilidade de P para o solo.

REFERÊNCIAS

ALTLAND, J. E., LOCKE, J. C. Gasified Rice Hull Biochar is a Source of Phosphorus and Potassium for Container-Grown Plants. **Journal of Environmental Horticulture**, v.31, n. 3, p. 138–144, 2013.

ALVAREZ et al., 2017 in Manual de Métodos de analyses de solo. 3ed. Brasília, DF. EMBRAPA, 2017.

ARIAS, M.; PÉREZ-NOVO, C.; LÓPEZ, E.; SOTO, B. Competitive adsorption and desorption of copper and zinc in acid soils. **Geoderma**, v. 133, n. 3, p.151-159, 2006.

BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I - Trabalhos de laboratório. *Ceres*, São Paulo, v.19, p.124-136, 1972.

CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; DANTAS, E. R. B.; GUERRA, H. C.; TITO, G. A.; SILVA, A. A. R.; LAURENTINO, L. G. S.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B.; CHAVES, I. B. Characterization of poultry litter biochar for agricultural use. **Sylwan**, v. 164, n. 6, p. 468-487, 2020.

CHEN Y, LI X Y, LI S Y, et al. Novel-integrated process for production of bio-organic fertilizer via swine manure composting. *Environmental Engineering Research*. v. 26, n. 2, p. 190522. 2020.

CHINTALA, R.; SCHUMACHER, T. E.; McDONALD, L. M.; CLAY DE.; MALO, D. D.; PAPIERNIK, S. K.; et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. **Clean: Soil, Air, Water**, v. 42, n. 5, p. 626-634, 2014.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p.153-159, 2011.

CUI, H. et al. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, p. 1135– 1141, 2011.

DELUCA, T. H.; MACKENZIE, M. D.; GUNDALE, M. J. Biochar effects on soil nutrient transformation. **Chapter 14**, pp. 251-280. 2009.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Phosphorus adsorption characteristics in some central Amazonian soils. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 34, n. 3, p. 337-42, 2004.

FENG, Y.; ZHAO, D.; QIU, S.; HE, Q.; LUO, Y.; ZHANG, K.; SHEN, S.; WANG, F. Adsorption of Phosphate in Aqueous Phase by Biochar Prepared from Sheep Manure and Modified by Oyster Shells. **ACS Omega**, v. 6, n. 48, p. 33046-33056, 2021.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS, E. R. B.; LAURENTINO, Laysa G. de S.; CAVALCANTE, Antônio R.; KUBO, Gustavo T. M. Thermal treatment of poultry litter: part i. characterization by immediate analysis and gravimetric yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 9, p. 633-639, 2022.

FERNANDES, J. D.; GUERRA, H. C.; CHAVES, L. H. G.; LAURENTINO, L. C. D. S.; CAVALCANTE, A. R.; KUBO, G. T. M. Thermal treatment of poultry litter: Part II. Evaluation of structural and morphological characteristics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.9, p.680-687, 2022a.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS, E. R. B.; TITO, G. A.; GUERRA H. O. C. Phosphorus availability in soil incubated with biochar: adsorption study. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 206 – 215, 2022b.

FERREIRA, C. I. **Nanocompósitos PP/ grafite: obtenção e propriedades**. 2008. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FERREIRA, R. C.; LIMA, H. H. C.; COUTO JUNIOR, O. M.; et al. Utilização de carvão ativado de dendê in natura e funcionalizado em meio ácido na adsorção de paracetamol. **Matéria**, v. 23, n. 1, p. 11968, 2018.

FU, L.; X. CUI, Y.; LI, L.; XU, C.; ZHANG, R.; XIONG, D.; ZHOU, J. C.; CRITTENDEN. Excessive phosphorus enhances *Chlorella regularis* lipid production under nitrogen starvation stress during glucose heterotrophic cultivation. **Chemical Engineering Journal**, v. 330, p.566-572, 2017.

GUARNIERI, S. F. **Alterações de atributos do solo devido ao emprego de biocarvões de frutos de *Coco nucifera* L.** 2016. 44f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá – MT.

GUERRA, P. (2014). **Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en**

la Amazonía Peruana. Tesis de Grado. Universidad Nacional Agraria La Molina, p. 101.

HENRIQUE, M. A.; SILVÉRIO, H. A.; NETO, W. P. F.; PASQUINI, D. Valorization of an agro-industrial waste, mango seed, by the extraction and characterization of its cellulose nanocrystals. **Journal of environmental management**, v. 121, p. 202-209, 2013.

KAMARA, A. et al. Effect of Rice Straw Biochar on Soil Quality and the Early Growth and Biomass Yield of Two Rice Varieties. **Agricultural Sciences**, n. 6, p. 798-806, 2015.

KAPOOR, A.; SHARMA, R.; KUMAR, A.; SEPEHYA, S. Biochar as a means to improve soil fertility and crop productivity: A review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 15, p. 2380-2388, 2022.

LÁZARO, D. A.; MANSUR, M. B.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; ROCHA, S. D. F. Performance of coldpressed cake from *Raphanus sativus* (L.Var.) oilseeds, a solid residue from biodiesel production, as adsorbent for basic dyes. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 1, p. 289- 302, 2008.

LEANDRO-SILVA, E.; PIPI, A. R. F.; MAGDALENA, A. G.; PIACENTI-SILVA, M. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. **Revista Matéria**, v.25, n.2, 2020.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen. Biochar for environmental management: science and technology. London, GB: Earthscan, 2009.

LUO, X.; WANG, X.; BAO, S.; LIU, X.; Zhang W.; Fang, T. Adsorption of phosphate in water using one-step synthesized zirconium-loaded reduced graphene oxide. **Sci Rep.** v. 6, n. 1, p. 1–13, 2016.

MAHADEVAN, H. et al. Optimization of retention of phosphate species onto a novel bentonite-alum adsorbent system. **Environmental Technology & Innovation**, v. 9, p. 1–15, 2018.

MAHMOUD, E.; BAROUDY, A. E.; ALI, N.; SLEEM, M. Spectroscopic studies on the phosphorus adsorption in salt-affected soils with or without nano-biochar additions. **Environmental Research**, v. 184, p. 109277, 2020.

MCBRIDE, M. B. Environmental chemistry of soils. New York, University Press, 1994. 406p. KIM, K. et al. Quantitative measurement on removal mechanisms of phosphate by class-F fly ash. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 38, p. 1–12, 2018.

MCKAY, G. Use of adsorbents for the removal of pollutants form wastewaters. Florida, CRC Press, 1996.

MENDES, J. S.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; GUERRA, H. O. C.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B. Chemical and Physical Changes of Soil Amended with Biochar, **Water Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 8, 1-13, 2021.

MORAIS, V. A.; SCOLFORO, J. R. S.; SILVA, C. A.; MELLO, J. M.; GOMIDE, L. R.; OLIVEIRA, A. D. Carbon and biomass stocks in a fragment of cerrado in Minas Gerais State, Brazil. *Cerne*, v. 19, p. 237-245, 2013.

MORALES, M. M.; COMERFORD, N.; GUERRINI, I. A.; FALCAO, N. P. S.; REEVES, J. B. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar–soil mixtures. *Soil Use Manag.* Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar–soil mixtures. **Soil use and management**, v 29, n. 3, p. 306-314, 2013.

MURPHY, P. N. C.; STEVENS, R. J. Lime and gypsum as source measures to decrease phosphorus loss from soils to water. **Water Air and Soil Pollution**, v. 212, p. 101–111, 2010.

NARDIS, B. O.; CARNEIRO, J. S. D. S.; SOUZA, I. M. G. D.; BARROS, R. D.; MELO, L. C. A. Phosphorus recovery using magnesium-enriched biochar and its potential use as fertilizer. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1017-1033, 2020.

NGATIA, L. W.; HSIEH, Y. P.; NEMOURS, D.; FU, R.; TAYLOR, R. W. Potential phosphorus eutrophication mitigation strategy: Biochar carbon composition, thermal stability and pH influence phosphorus sorption. **Chemosphere**, n. 180, p. 201-21, 2017.

NOVAIS, S. V. et al. Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with $MgCl_2$ for phosphorus adsorption. **Journal of Environmental Management**, n. 214, p. 36-44, 2018.

OLIVEIRA, M. B.; GATIBONI, L. C.; MIGUELLUTI, D. J.; SMYTH, T. J.; ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1805-1815, 2014.

QIAN, T. et al. Effects of environmental conditions on the release of phosphorus from biochar. **Chemosphere**, v. 93, p. 2069–2075, 2013.

SEVERINO, L. S. et al. Mineralização da torta de mamona, esterco bovino e bagaço de cana estimada pela respiração microbiana. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v. 5, n. 1, 2005.

SHEPHERD, J. G., JOSEPH, S., SOHI, S. P., and HEAL, K. V. Biochar and Enhanced Phosphate Capture: Mapping Mechanisms to Functional Properties. **Chemosphere**, v. 179, p. 57–74, 2017.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. Characterization and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 516-525, 2010.

SPARKS, D. L. Environmental chemistry of soils. California: Academic Press. 2003. 267 p.

TITO, G. A.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; GUERRA, H. O. C.; DANTAS, E. R. B. Organic carbon mineralization of the biochar and organic compost of poultry litter in an Argisol, **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 6, p. 3167-3184, 2021.

WEI, L. et al. Regulating environmental factors of nutrients release from wheat straw biochar for sustainable agriculture. **Clean: Soil, Air, Water**, n. 41, p. 697–701, 2013.

WU, Y.; ZOU, Z.; HUANG, C.; JIN, J. Effect of Biochar Addition on Phosphorus Adsorption Characteristics of Red Soil. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 1-8, 2022.

YANG, L.; WU, Y.; WANG, Y.; AN, W.; JIN, J.; SUN, K.; WANG, X. Effects of Biochar Addition on the Abundance, Speciation, Availability, and Leaching Loss of Soil Phosphorus. **Science of The Total Environment**, v. 758, 143657. 2021.

ZHANG, H.; CHEN, C.; GRAY, E. M.; BOYD, S. E.; YANG, H.; ZHANG, D. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: a phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. **Geoderma**, v. 276, p. 1–6, 2016.

ZHAO, J-J.; HUANG, X-H.; HUA, L-L.; ZHOU, S-S.; JIANG, W.; TANG, Y-C.; QIAN, J. Effects of Tea Residue Biochar on Phosphorus Adsorption-Desorption in Soil. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 31, n. 3, p. 2461-2471, 2022.