Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.01, 2025
ISSN 2178-6925

PRODUÇÃO DE UM BIOFERTILIZANTE SÓLIDO À BASE DE CERA DE CARNAÚBA E NORBIXINA

PRODUCTION OF A SOLID BIOFERTILIZER BASED ON CARNAUBA WAX AND NORBIXIN

Janiel Costa da Silva
Doutorando em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal do Piauí/Campus Ministro Petrônio Portella, Brasil
E-mail: janiel.silva@ufpi.edu.br
Orcid ID: https://orcid.org/0000-0002-0876-9311

Leandro Josuel da Costa Santos
Doutorando em Ciências Farmacêuticas
Universidade Federal do Piauí/Campus Ministro Petrônio Portella, Brasil
E-mail: leandrosantos.educ@gmail.com
Orcid ID: https://orcid.org/0000-0001-6051-2540

Moisés das Virgens Santana
Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal do Piauí/Campus Ministro Petrônio Portella, Brasil
E-mail: moisesdvs@ufpi.edu.br
Orcid ID: https://orcid.org/0000-0003-1107-8455

Vicente Galber Freitas Viana
Doutor em Ciências (Física Aplicada)
Instituto Federal do Piauí/Campus Teresina central, Brasil
E-mail: galber@ifpi.edu.br
Orcid ID: https://orcid.org/0000-0002-3863-6974

Resumo

O objetivo dessa pesquisa visa verificar o comportamento de um biofertilizante sólido produzido a partir da mistura de cera de carnaúba do tipo “A” aquecida ate seu ponto de fusão seguida do acréscimo de norbixina por meio de caracterizações físico-químicas, toxicológica e de aplicação.

As caracterizações físico-químicas realizadas foram DRX, FTIR, TGA, DSC. O ensaio de toxicidade com *Allium cepa* foi realizado como teste biológico e, o ensaio de aplicação do biofertilizante em solo humoso. Os resultados obtidos revelaram que ocorreu diminuição da cristalinidade do biofertilizante de acordo com o aumento da quantidade de norbixina. As bandas de absorção mostraram que a norbixina contém grupos funcionais capazes de realizar interações intermoleculares com a cadeia da cera de carnaúba. Não houve alteração na estabilidade térmica do biofertilizante, como também, não ocorreu alteração da temperatura de fusão entre a cera e o biofertilizante produzido. O biofertilizante não revelou toxicidade nas proporções de norbixina adicionada. Porém, a aplicação do biofertilizante em solo humoso, torna-se necessário a realização de ensaios com maior duração, ou seja, com tempo superior a 10 dias.

Palavras-chave: Biofertilizante; Cera de carnaúba; Norbixina; Toxicidade; Aplicação.

Abstract

The objective of this research aims to verify the behavior of a solid biofertilizer produced from a mixture of type “A” carnauba wax heated to its melting point followed by the addition of norbixin through physical-chemical, toxicological and application characterizations. The physicochemical characterizations carried out were DRX, FTIR, TGA, DSC. The toxicity test with Allium cepa was carried out as a biological test and the biofertilizer application test in humous soil. The results obtained revealed that there was a decrease in the crystallinity of the biofertilizer in accordance with the increase in the amount of norbixin. The absorption bands showed that norbixin contains functional groups capable of performing intermolecular interactions with the carnauba wax chain. There was no change in the thermal stability of the biofertilizer, nor was there any change in the melting temperature between the wax and the biofertilizer produced. The biofertilizer did not reveal toxicity in the proportions of norbixin added. However, when applying biofertilizer to moist soil, it is necessary to carry out longer tests, that is, longer than 10 days.

Keywords: Biofertilizer; Carnauba wax; Norbixin; Toxicity; Application.

1. Introdução

No ano de 2018, o Brasil liderou o ranking global de importações de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, com despesas de 2,68 bilhões, 360,57 milhões e 3,35 bilhões de dólares, respectivamente (ALOVISI et al., 2021). Em 2020, o país adquiriu aproximadamente 21,1 milhões de toneladas de fertilizantes, resultando em um investimento de 5,8 bilhões de reais (FORMIGONI, 2020). Dessa maneira, o setor agropecuário brasileiro se destaca como um consumidor recorrente de fertilizantes, evidenciando sua dependência da produção externa, tornando-o suscetível a vulnerabilidades (JÚNIOR et al., 2020).

No que diz respeito à saúde pública, a evolução de tecnologias sustentáveis e ambientalmente adequadas tem levado, ao longo do tempo, a uma diminuição na utilização de fertilizantes químicos (SANTOYO et al., 2012 e ZHANG et al., 2021). O uso de insumos orgânicos destinados à fertilização pode estimular a atividade microbiana do solo, facilitando a conversão de fósforo (P) em plantações de campo (BI et al., 2020 e WEI et al., 2021).

A aplicação de insumos naturais vem ganhando destaque na agricultura, especialmente com o uso de biofertilizantes sólidos como fontes de matéria orgânica que atendem às necessidades nutricionais das plantas. Os compostos orgânicos são os fertilizantes mais comuns na sua forma sólida e, além de fornecer nutrientes, podem atuar como defensivos naturais, pois favorecem o crescimento de bactérias benéficas para as plantas (VASCONCELOS et al., 2019).

A aplicação de biofertilizantes na agricultura é amplamente considerada benéfica, alinhando-se aos princípios da agricultura sustentável. Esses produtos são vistos como viáveis e apresentam propostas agroecológicas, sendo eficazes e favoráveis ao meio ambiente. Eles melhoram a eficiência do processo produtivo e reduzem os custos, possibilitando que possam substituir, total ou parcialmente, os fertilizantes minerais na prática agrícola (DE SOUZA et al., 2021).

Segundo a Lei nº 6.894, de 1980 – art. 3º; Decreto nº 4.954, de 2004 – art. 1º; in SDA nº 23, de 2005 – art. 1º “um fertilizante orgânico é considerado como sendo um composto de determinado produto que será obtido a partir de matéria prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isolada ou misturada, podendo está enriquecido com nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo”.

A cera de carnaúba é um exsudato vegetal obtido pelo processamento do pó extraído das folhas da palmeira de carnaúba, a *Copernicia cerifera*, uma palmeira brasileira (DE MORAES *et al.,* 2022). Das folhas mais novas e fechadas, é extraído um pó considerado o mais puro que pode ser extraído das palhas, pois o mesmo possui a menor quantidade de impurezas e que produz a cera do “Tipo 1”, apresentando a cor amarelo-ouro (DE MORAES *et al.,* 2022)..

Bixina e norbixina são compostos presentes no urucum (*Bixa orellana L*), que apresentam propriedades antioxidante, antimicrobiana e antitumoral, destacando-se a norbixina, encontrada no pericarpo das sementes do urucum são utilizados na indústria de alimentos, além de ser usada como corante em indústria têxtil. Em sua estrutura encontram-se dois radicais carboxilatos nas extremidades,

apresentando a capacidade de reagir contra radicais livres (MUTHUKUMAR *et al.,* 2014; SANTOS, 2014; YUSA MARCO, 2008 e ZHANG & ZHONG, 2013).

Certifica-se o produto que contenha princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias tóxicas, capaz de atuar de forma direta ou indireta sobre o todo ou parte de plantas cultivadas, elevando-se a produtividade, como biofertilizante. O referido produto, quando isento de sódio (Na^+), metais pesados, elementos e compostos orgânicos tóxicos, será colocado na referência "A"(LEAL & COELHO, 2007).

Este trabalho teve como objetivo produzir um biofertilizante sólido através da mistura da cera de carnaúba Tipo "1" com quantidades do carotenóide norbixina. Para tal, foram realizadas caracterizações físico-químicas para verificar a compatibilidade entre cera/carotenóide, seguido de teste de toxicidade e aplicação em solo com o intuído de determinar sua ação fertilizante.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Para a produção do biofertilizante foram utilizados cera de carnaúba tipo 1 na forma de pó (Empresa Brasil Ceras LTDA), as sementes de urucum foram adquiridas no comercio local do município de Teresina – Pi. Hidróxido de potássio (85% de pureza, Vetec, Brasil) foi empregado na extração do sal de norbixina. Ácido clorídrico (36% de pureza, Dinâmica, Brasil) foi usado para neutralizar o extrato e converter o sal de norbixina em norbixina.

2.2 Extração do carotenóide norbixina com solução extratora alcalina

A norbixina foi obtida pelo método de extração com solução alcalina, seguindo metodologia proposta por Witono *et al.,* (2022) com pequenas adaptações. Separou-se 200 gramas de sementes de urucum lavadas com água destila e colocadas em estufa a 50°C por 12 horas para secagem. Em seguida, as sementes foram adicionadas a uma solução de KOH à 4% (m/v) seguida de aquecimento a 70°C por 1 hora com agitação constante. Nesta etapa ocorre a

formação do sal de norbixina. Por fim, foi acrescentado ácido clorídrico concentrado para neutralização e precipitação da norbixina.

2.3 Produção do biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2

O biofertilizante foi produzido a partir de uma massa definida de cera de carnaúba aquecida até seu ponto de fusão, que ocorreu a 80°C, aproximadamente. Em seguida, foram adicionadas quantidades do carotenóide norbixina nas proporções de 0,5% (biofertilizante sólido 1) e 1% (biofertilizante sólido 2). As misturas foram mantidas em aquecimento e agitação magnética por 20 minutos. Por fim, as misturas foram levadas para o dessecador por 24 horas e macerados até a obtenção de um pó.

2.4 Caracterizações

2.4.1 Difração de Raios X (DRX)

As amostras dos componentes e do biofertilizante foram analisadas em difratômetro de raios-X da marca Panalytical, modelo Empyrean Série 2, equipado com tubo de cobalto com λ= 1,78 nm juntamente com monocromador secundário para Co, tensão de 40 kV e corrente de 45 mA. As amostras foram analisadas no intervalo de ângulos de difração 2θ variando de 5 a 80° e velocidade 2°C/mim^{-1}.

A equação de Scherrer [$D_{hkl} = K \cdot \lambda / \beta \cdot \cos(\theta)$] foi utilizada para a determinação do tamanho médio dos cristalitos.

2.4.2 Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram realizadas em espectrômetro Fourier Transform Infrared Spectrophotometer Ir Affinity-1 da marca SHIMADZU com registro de número de ondas na faixa de 4000 a 400 cm^{-1}. Os espectros de IV foram obtidos na resolução de 16 cm^{-1}. As amostras foram preparadas em forma de pastilhas com brometo de potássio (KBr) e as bandas observadas no espectro foram caracterizadas de acordo com seus grupos funcionais.

2.4.3 Analise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em equipamento da marca Shimadzu, modelo TGA-51. As condições de análise foram: faixa de temperatura de teste de 25 a 800°C, taxa de aquecimento de 10°C. min^{-1}, atmosfera de nitrogênio a 50 $mL \cdot min^{-1}$ e porta-amostra de platina.

2.4.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A medição DSC foi realizada em equipamento da marca Shimadzu – Modelo DSC 60 Plus nas seguintes condições: faixa de temperatura de teste de 25 a 600°C, taxa de aquecimento de 10 $°C \cdot min^{-1}$, atmosfera de nitrogênio a 50 $mL \cdot min^{-1}$ e porta amostra de alumínio.

2.4.5 Teste de Toxicidade por *Allium cepa*

O teste da toxicidade por *Allium cepa* é um excelente bioindicador da toxicidade, além da facilidade e custo beneficio (PINHEIRO *et al.,* 2022). O teste com o biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2 foi realizado no Laboratório de Físico-Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí campus - Teresina central e seguiu o procedimento proposto por Arraes & Longhin, (2012) e Dos Santos *et al.,* (2021) com adaptações. Foram utilizadas 5 réplicas do organismo *A. cepa* de tamanhos médios adquiridas no comércio local do município de Teresina-Pi. As réplicas foram descascadas e a parte da raiz cortada superficialmente. Em seguida, 4 grupos contendo 5 amostras foram colocadas em recipientes de 200 mL contendo água destilada, cera de carnaúba, Bio_S1 e Bio_S2, respectivamente. Os bulbos foram imersos na água deionizada (controle) e nas soluções por um período de 7 dias, em temperatura média de 25°C ± 1°C e com iluminação de lâmpada fluorescente.

2.4.6 Aplicação do Biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2 em Solo humoso

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Físico-Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, campus Teresina central, localizado no município de Teresina – PI, segundo procedimentos propostos por Westfal *et al.,* (2012) e Monteiro *et al.,* (2021) com adaptações. Foi

utilizado o feijão verde (*Phaseolus vulgaris*) adquirido no comércio local, limpas, lavadas com água destilada e colocadas pra secar a sombra.

A semeadura foi realizada em recipientes de poliestireno de 200 mL com delineamento experimental em blocos ao acaso, com três tratamentos: solo úmido (controle), solo úmido + Bio_S1, proporção de 6:1 (m/m) e solo úmido + Bio_S2, proporção 6:1 (m/m) e cinco repetições de três sementes, totalizando 45 unidades experimentais.

Após o décimo dia de ensaio, os parâmetros analisados foram quantidade de sementes germinadas, massa fresca, comprimento do caule e quantidade de folhas. A massa fresca foi determinada após separar do material vegetal e aferidas em balança analítica com precisão de 0,0001g. O comprimento do caule foi medido com uma régua graduada em cm.

Analise Estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste *t* de *student* ($p < 0,05$), para verificação da normalidade e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey em nível de 5% de probabilidade.

3. Resultados e Discussão

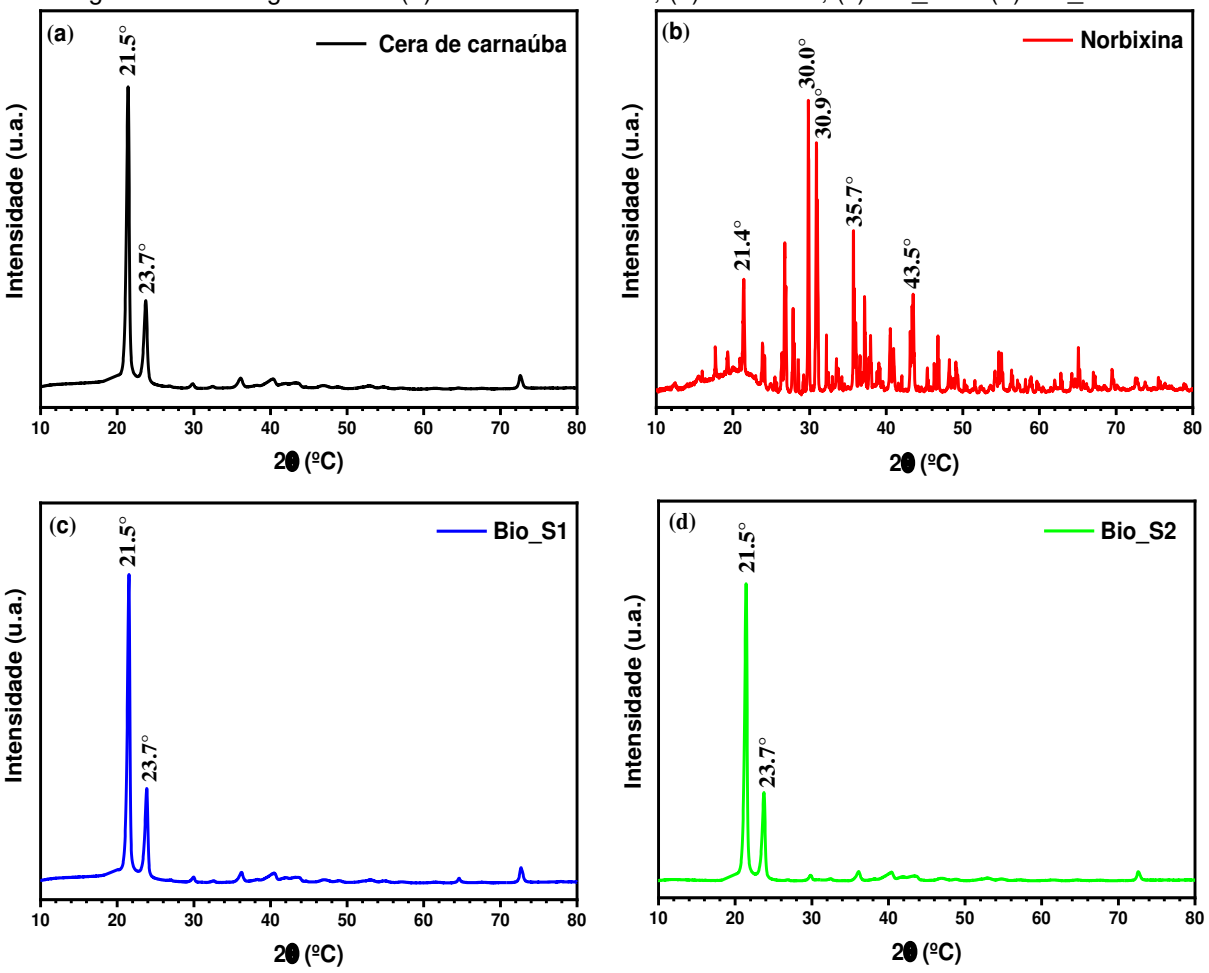
3.1 Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 1(a) é visto um padrão com dois picos fortes e estreitos em 2θ de 21,5° e 23,7° típico da estrutura cristalina da cera de carnaúba, indicando a presença do *p*-metoxicinâmicos (FREITAS et al., 2016). Na Figura1(b) os picos referentes à norbixina, foram observados nos ângulos 2θ de 21,4°; 30°; 30,9°; 35,7° e 43,5°. Porém, quando a norbixina é incorporada na cera de carnaúba, Figuras 1(c) e 1(d), provocou pequena redução na cristalinidade do Bio_S2 em relação ao Bio_S1. Essa diminuição pode estar relacionada ao afastamento das estruturas da cera pela incorporação transversal da norbixina.

A norbixina adicionada estaria ligada por ligação de Hidrogênio ao oxigênio do grupo éster, situada entre as duas estruturas poliméricas da cera de carnaúba,

provocando afastamento dessas cadeias, diminuindo a cristalinidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Rodrigues, (2004) ao utilizar polidiamidas como enxerto entre estruturas de polianilina ligadas ao Nitrogênio da amina, situadas entre anéis benzenoides.

Figura 1 - Difratogramas da (a) Cera de carnaúba, (b) Norbixina, (c) Bio_S1 e (d) Bio_S2.



Fonte: Os autores.

Outro fator de grande relevância é o teor de cristalinidade determinados através da equação de Scherrer. Os dados obtidos na Tabela 1 indicaram que a incorporação da norbixina nas proporções de 0,5% e 1% provocou uma alteração, de forma não significativa sobre o padrão cristalino das partículas de cera de carnaúba, reduzindo assim a cristalinidade do material produzido.

Tabela 1 – Teor de cristalinidade da cera de carnaúba e dos biofertilizantes produzidos.

Amostras	Área total dos picos cristalinos	Área total de todos os picos (cristalino + amorfo)	Cristalinidade (%)
Cera de carnaúba	1460341, 144	2290666, 830	63,7
Bio_S1	1475997, 682	2408906, 780	61,2
Bio_S2	1372891, 435	2265167, 380	60,6

Fonte: Os autores.

3.2 Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

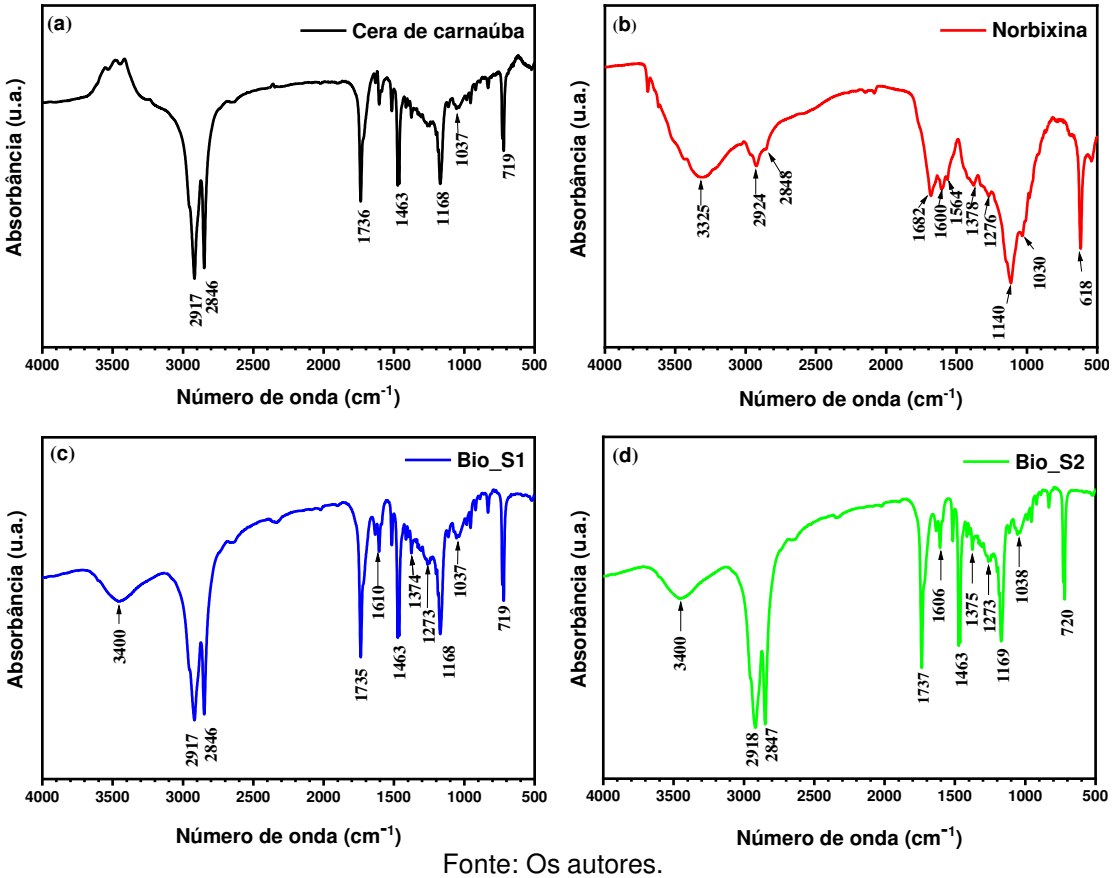
No espectro da cera de carnaúba, Figura 2(a), foram observadas bandas em 2917 e 2846 cm^{-1} que estão relacionadas ao alongamento assimétrico e simétrico, respectivamente, (—CH) dos grupos (CH_2) (GUTIÉRREZ, 2017). A banda 1736 cm^{-1} é referente ao estiramento assimétrico da carbonila (C=O) (FIOCCO *et al.,* 2021). Com relação à banda 1463 cm^{-1}, ocorre deformação angular simétrica no plano do grupo (CH_2) e, para banda 719 cm^{-1} deformação é angular simétrica fora do plano do grupo (CH_2). A banda 1037 cm^{-1} é atribuída à deformação angular do grupo (—CO—) (GUTIÉRREZ & ALVAREZ, 2017).

Na Figura 2(b) o espectro da norbixina observou uma banda larga em 3325 cm^{-1}, indicando a presença de grupos (—OH) e (—NH) (FONTANA, 2016). A banda em 2923 cm^{-1}, que segundo Gutiérrez & Alvarez, (2017) indica a vibração alifática do grupo metil (—CH_3) e, em 2848 cm^{-1} é atribuída ao estiramento assimétrico dos grupos (—CH_2) e (—CH_3) (FONTANA, 2016). A banda em 1276 cm^{-1} indica a presença de grupo carbonila (—CO—). A banda em 1600 cm^{-1} indica o alongamento da ligação alceno (C=C), e a banda em 1140 cm^{-1} indica as vibrações do grupo éster (C–O–C). A banda em 1030 cm^{-1} foi atribuída à flexão assimétrica de (C—H). De acordo com Dos Santos *et al.,* (2021) essas bandas de absorção são típicas de compostos carotenóides, principalmente relacionados à bixina e norbixina.

As Figuras 2(c) e 2(d) mostram os espectros do biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2, respectivamente, as principais bandas de absorção características da norbixina coincidiram com as bandas da cera de carnaúba, provocando sobreposição. No entanto, deslocamentos nas bandas de absorção dos grupos funcionais da cera de carnaúba eram esperados, pois, segundo Skornyakov & Komar (1998) os principais componentes do urucum (norbixina/bixina) contêm

grupos funcionais capazes de interações intermoleculares com a cadeia da cera de carnaúba.

Figura 2 - Infravermelho da cera de carnaúba (a), norbixina (b), Bio_S1(c) e Bio_S2 (d)



Fonte: Os autores.

3.3 Analise Termogravimétrica (TGA)

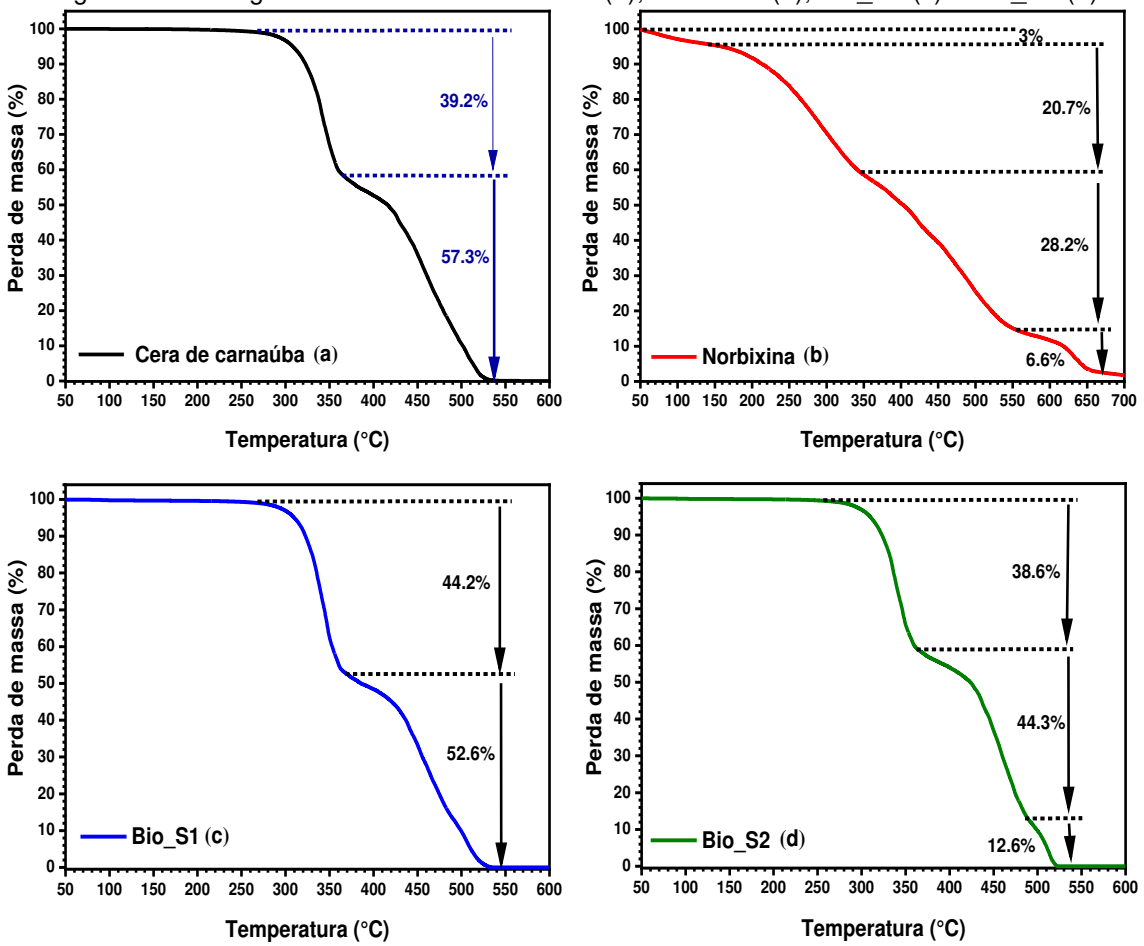
A Figura 3 mostra o comportamento térmico da cera de carnaúba, norbixina e dos biofertilizantes Bio_S1 e Bio_S2, respectivamente. A partir dos termogramas foi possível observar os valores relativos à variação de temperatura com a respectiva perda de massa nos eventos ocorridos na degradação das amostras.

Na Figura 3(a) foram observados dois eventos de degradação entre 200 e 550°C, o que indicou maior perda de massa da cera de carnaúba. A decomposição térmica quase completa ocorrida de acordo com Freitas *et al.,* (2016) indica a pureza da cera de carnaúba. Além disso, Barrozo, Santos & Cunha, (2013) obtiveram termogramas semelhantes ao utilizar fibras de carnaúba observaram dois picos principais de decomposição, o primeiro pico entre 207 a

320°C, com perda de 25,3% em massa e o segundo pico entre 320 a 414°C, com perda de massa de 28,2%.

Na Figura 3(b) observou-se a presença de 4 eventos térmicos. O primeiro evento ocorreu entre 50 a160°C o que indicou perda de água por evaporação que, segundo Barrozo, Santos & Cunha, (2013) estar associada ao seu caráter higroscópico da norbixina. O segundo, terceiro e quarto eventos estão relacionados ao fato que durante a degradação da norbixina ocorreu a eliminação de vários tipos de substâncias com diferentes massas moleculares, como tolueno, xileno e dimetil *o*-dihidronaftaleno. Também, Scotter, Thorpe & Reynolds, (2015) relataram que esses eventos térmicos provocam a quebra das ligações duplas da cadeia carbônica dos carotenóides.

Figura 3 - Termogramas da Cera de carnaúba (a), Norbixina (b), Bio_S1 (c) e Bio_S2 (d).



Fonte: Os autores

As Figuras 3(c) e 3(d) mostraram que mesmo após a incorporação da norbixina não houve aumento significativo na estabilidade térmica do

biofertilizante. Além disso, vale ressaltar que a partir do aumento da quantidade do carotenóide incorporado junto à cera, houve o surgimento do terceiro evento térmico, no caso do Bio_S2. A incorporação de moléculas de extrato de urucum pode dificultar as reações envolvidas na degradação térmica da cera de carnaúba.

Comportamento térmico semelhante foi observado por Dos Santos *et al.,* (2022) na degradação de nanofibras de acetato de celulose com extrato de urucum acima 368ºC. Nessa amostra foi visto uma taxa de perda de massa menor do que as amostras de acetato puro, fato este que pode estar associado à degradação térmica das moléculas de bixina e norbixina, que ocorre entre 280 e 380°C.

3.4 Analise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

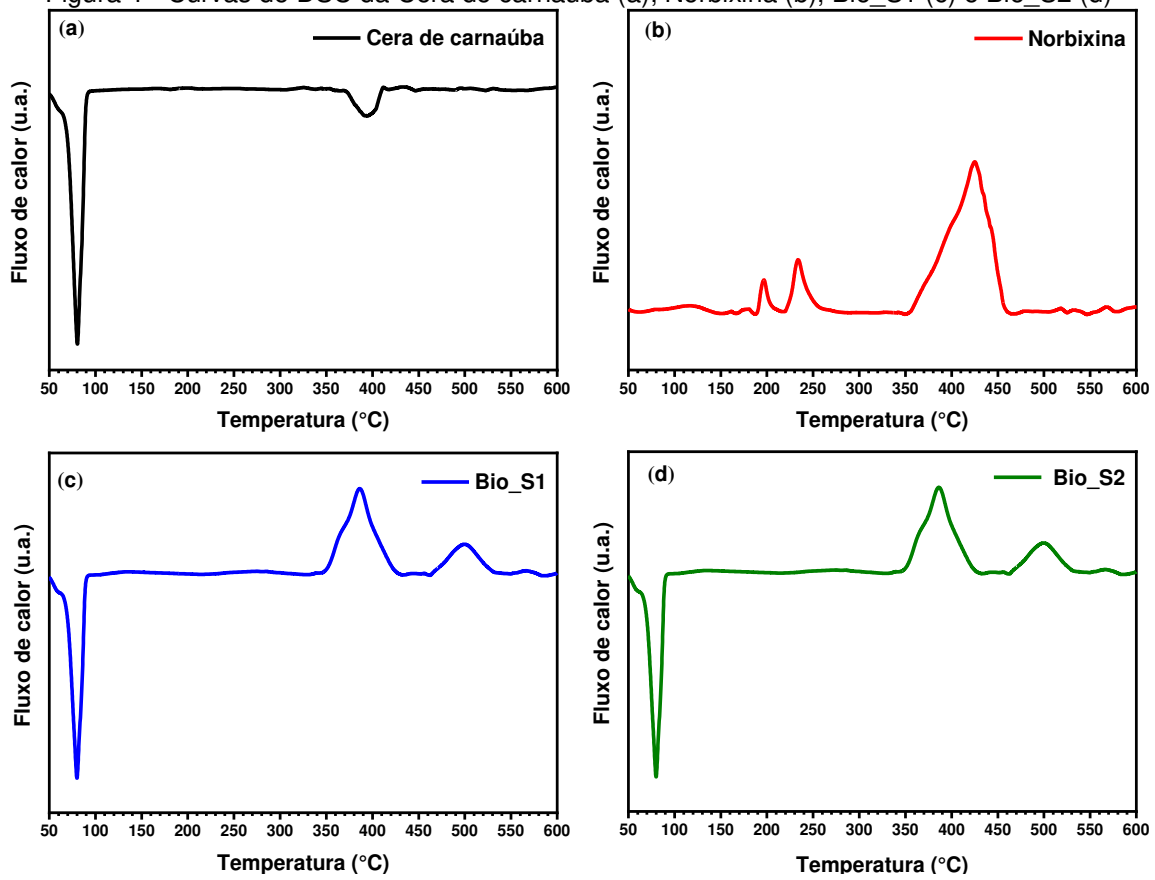
A Figura 4 mostra as curvas de DSC dos componentes cera de carnaúba, norbixina e do biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2 onde não foi observado grandes variações nos eventos térmicos, porém, houve um pequeno aumento da entalpia relacionado à fusão do biofertlizante em comparação com a cera de carnauba. A Tabela 2 mostra os valores numéricos que simplificam os comportamentos térmicos observados.

A curva a cera de carnaúba, Figura 4(a) revelou a temperatura de fusão da cera de carnaúba ocorrendo em 80,37°C. Também, foi observado que acima de 200°C teve o início da degradação térmica da cera com temperatura final acima de 500°C, segundo Wermuth, Tavares & Schaeffer (2014) nesse intervalo de temperatura quase toda a massa dos hidrocarbonetos são degradados. Além disso, Khiabani *et al.,* (2020) relataram que o grande intervalo entre o início da temperatura de fusão e o ponto de pico indica a estrutura mais complexa de cera de carnaúba.

No caso da curva da norbixina, Figura 4(b) são observados três picos exotérmicos, nas temperaturas de 196, 233 e 424°C. Entretanto, Sousa *et al.,* (2020) evidenciaram a presença de quatro picos, sendo três deles de origem exotérmica - nas temperaturas de 174, 210 e 466°C e o quarto sendo endotérmico e ocorrendo a 416°C. Além disso, o termograma da norbixina não

mostrou nenhum evento associado a um processo de mudança de fase até a temperatura final do ensaio.

Figura 4 - Curvas de DSC da Cera de carnaúba (a), Norbixina (b), Bio_S1 (c) e Bio_S2 (d)



Fonte: Os autores

A incorporação da norbixina para a produção dos biofertilizantes Bio_S1 e Bio_S2, Figura 4(c) e 4(d), proporcionou uma diminuição na intensidade do pico de fusão. Ao sintetizar óleo gel de cera de carnaúba com ácido adípico, Thakur *et al.,* (2022) observaram que a presença do ácido adípico, não apresentou comportamento térmico característico, apenas provocou a diminuição da intensidade deste pico.

Além disso, como a temperatura de fusão da cera de carnaúba se manteve semelhante no biofertilizante, tem – se a confirmação da compatibilidade química entre a cera e a norbixina, observando que não ocorreu reação entre os componentes, mas apenas proteção, o que de acordo com Pereira *et al.,* (2020) não compromete a liberação para o meio ambiente.

Tabela 2 – Valores numéricos das propriedades físicas obtidas por DSC da cera de carnaúba, norbixina e dos biofertilizantes produzidos.

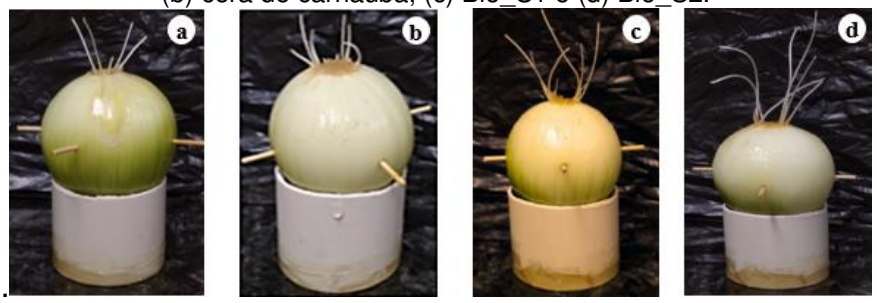
Amostras	Evento Térmico	T_{onset} (°C)	T_{endset} (°C)	T_{peak} (°C)	ΔH (J/g)
Cera de carnaúba	1º	68,99	89,42	80,37	325,33
	2º	372,95	410,45	394,65	68,55
Norbixina	1°	188,63	204,64	196,45	7,00
	2°	222,63	246,84	233,73	20,91
	3°	381,86	456,17	424,70	179,44
Bio_S1	1º	69,06	88,78	79,92	332,82
	2º	359,14	409,67	386,26	376,97
	3º	466,16	528,23	499,68	150,48
Bio_S2	1º	68,18	89,65	80,53	332,07
	2º	387,15	422,31	403,90	96,96
	3º	471,97	514,34	493,72	157,34

Legenda: T_{onset} (temperatura inicial extrapolada), T_{endset} (temperatura final extrapolada), T_{peak} (temperatura do pico) e ΔH (variação da entalpia)
Fonte: Os autores.

3.5 Teste de toxicidade por *Allium cepa*

A Figura 5 mostra que houve um aumento no comprimento médio das raízes dos bulbos à medida que foram incorporadas as quantidades de norbixina para produção do biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2.

Figura 5 – Imagens das raízes dos bulbos após 7 dias de imersão em (a)água destilada (controle), (b) cera de carnaúba, (c) Bio_S1 e (d) Bio_S2.

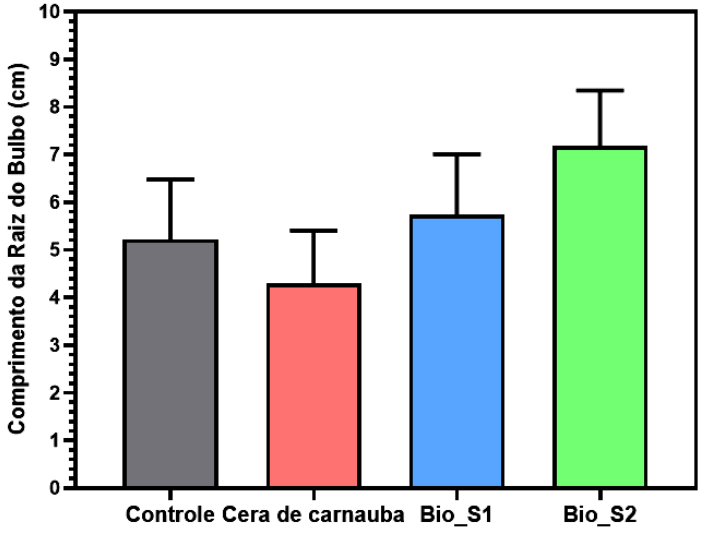


Fonte: Os autores

Na Figura 6 tem-se a validação do teste de toxicidade que ocorreu por meio da avaliação do crescimento e/ou inibição das raízes dos bulbos, medidas

em escala graduada em cm, ou seja, o comprimento da raiz foi considerado como parâmetro para verificação da toxicidade que o Bio_S1 e Bio_2 podem causar.

Figura 6 - Comprimento médio das raízes de *Allium cepa* expostas a água destilada (controle), cera de carnaúba, Bio_S1 e Bio_S2.



Fonte: Os autores

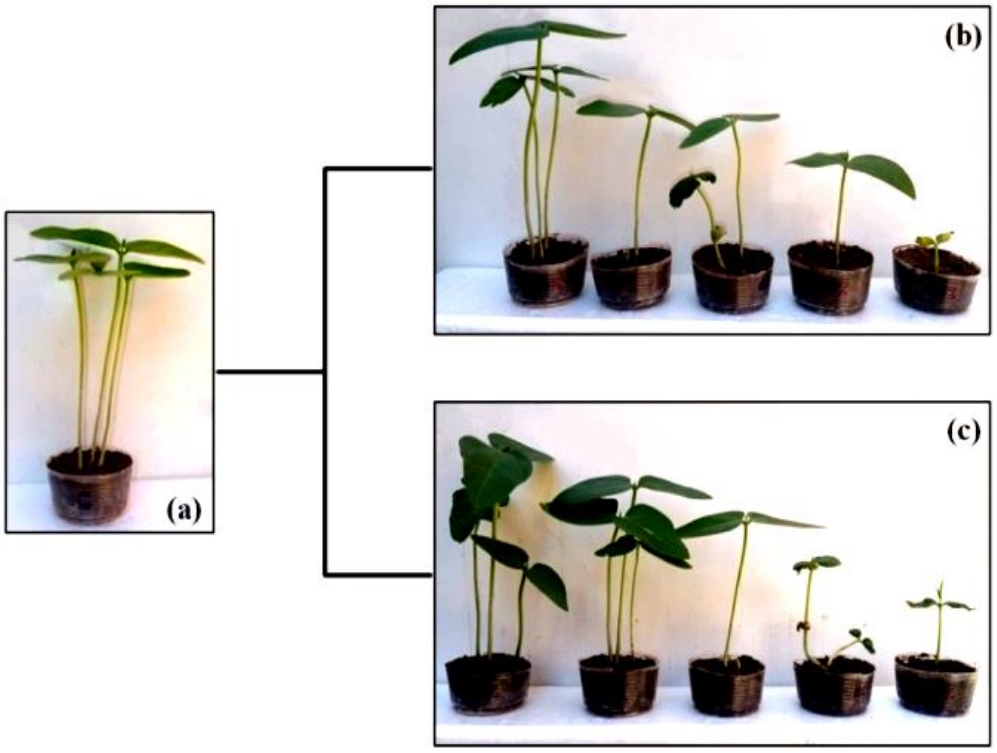
As raízes das *Allium cepas* que foram expostas ao biofertilizante Bio_S2 apresentaram comprimento médio, em cm, de 7,18 ± 1,16, o que representou um aumento de, aproximadamente, 30% em relação ao grupo controle. No caso das raízes expostas ao biofertilizante Bio_S1, o comprimento médio foi de 5,74 ± 1,27, o que representou um aumento de, aproximadamente, 4% em relação ao grupo controle. Porém, nas raízes que foram expostas à cera de carnaúba, o comprimento médio das raízes foi de 4,30 ± 1,11, o que indicou redução de, aproximadamente, 21% em relação ao grupo controle.

O aumento do comprimento das raízes no Bio_S1 e Bio_S2 estão relacionados à incorporação da norbixina, que segundo Isidoro *et al.,* (2021) os carotenóides do urucum causam menor toxicidade e geralmente exibem melhor biodegradabilidade e compatibilidade com o meio na qual estão inseridos. Por outro lado, a ocorrência na redução do comprimento das raízes expostas à cera de carnaúba, Alaguprathana *et al.,* (2022) relataram que está relacionada a ação de eventos independentes que levam ao alongamento celular ao invés de diferenciação celular na região proximal da ponta da raiz ou região meristemática mitoticamente ativa que pode provocar inibição da síntese de proteínas.

3.6 Aplicação do Biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2 em Solo Humoso

A Figura 7 mostra a evolução das sementes de feijão verde em quintuplicata que foram plantados em solo humoso (controle) e no solo humoso preparado com o biofertilizante (Bio_S1 e Bio_S2) onde não foi possível observar uma variação significativa no desenvolvimento do feijão no final do 10º dia de ensaio.

Figura 7- Desenvolvimento das sementes de feijão verde após 10 dias em (a) solo humoso (controle), (b) solo humoso + Bio_S1, e (c) solo humoso + Bio_S2.

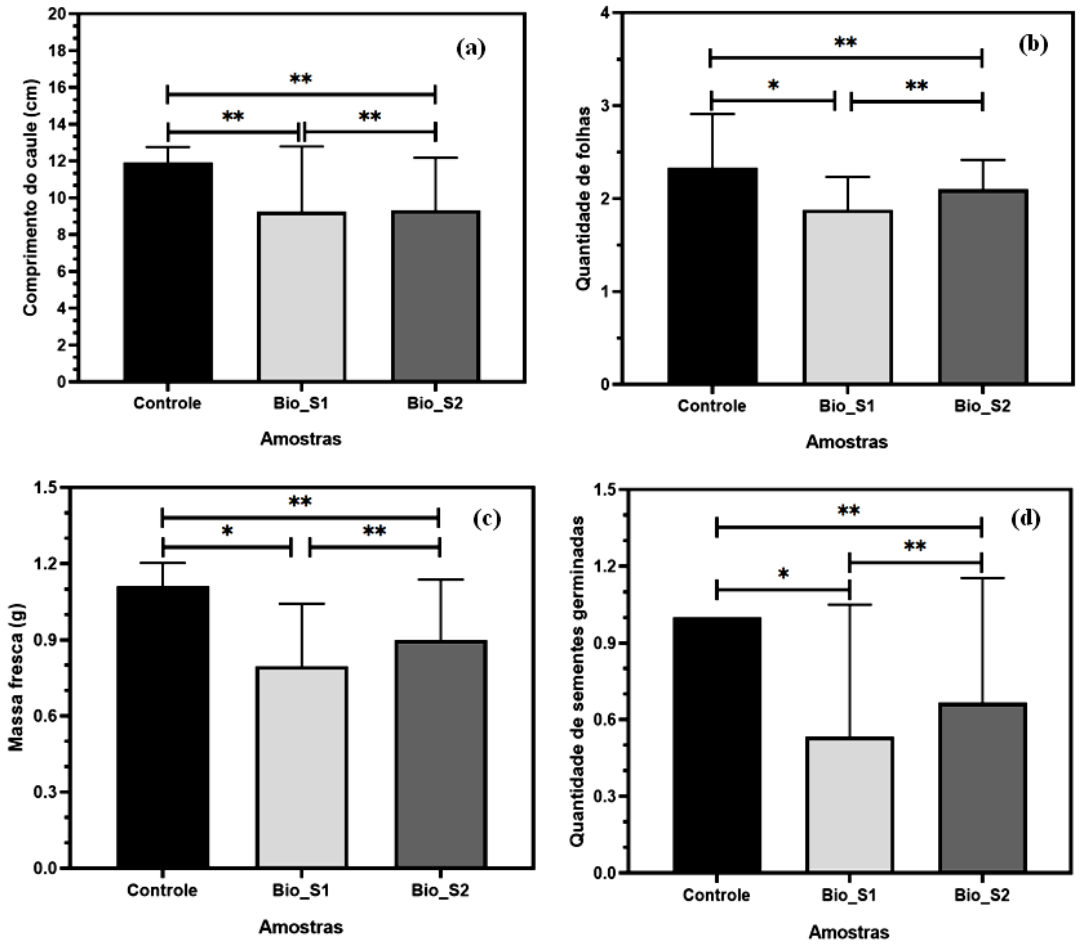


Fonte: Os autores

A Figura 8 foi observado um comportamento semelhante as amostras que foram submetidas ao biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2, ou seja, não provocaram influencia nos parâmetros analisados: comprimento do caule, quantidade de folhas, massa fresca e quantidade de sementes germinadas, uma vez que os dados estatísticos revelaram que não houve diferença significativa entre as quantidades utilizadas. Porém, entre os grupos Bio_S1 e o controle, notou-se a ocorrência de uma diferença significativa ($p < 0,05$) em relação aos parâmetros quantidade de folhas (b), massa fresca (c) e quantidade de sementes germinadas (d), No entanto, este fato não foi observado entre os grupos Bio_S2 e o controle,

o que pode estar relacionado com as forças intermoleculares estabelecidas entre a cera de carnaúba que possui na sua estrutura a presença, principalmente, de ácidos graxos e ésteres de cadeia longa, com o carotenóide norbixina, que possui dois radicais carboxilas. Os fertilizantes que possuem cera de carnaúba em sua composição, segundo Neto *et al.,* (2023) desenvolvem um mecanismo de repulsão da água que tenta penetrar no seu interior, retardando assim a solubilização dos nutrientes e com isso, o respectivo desenvolvimento das sementes.

Figura 8 – Analise da variância do biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2 para os parâmetros comprimento do caule (a), quantidade de folhas (b), massa fresca (c) e quantidade de sementes germinadas (d).



Legenda: * ($p < 0,05$) e ** (não significativo)
Fonte: Os autores.

4. Conclusão

A partir dos resultados é possível concluir que ambos os biofertilizantes Bio_S1 e BIo_S2 mostraram-se como um interessante substituto para os fertilizantes convencionais. Os difratogramas revelaram que a partir da

incorporação da norbixina houve redução na cristalinidade dos biofertilizantes. No caso da análise das bandas de absorção do infravermelho, não ocorreu reação entre os componentes, uma vez que a norbixina contêm grupos funcionais capazes de interações intermoleculares com a cadeia da cera de carnaúba. As análises térmicas revelaram que não houve aumento significativo na estabilidade térmica entre o biofertilizante Bio_S1 e Bio_S2. E também, a temperatura de fusão da cera de carnaúba e dos biofertilizantes não apresentaram diferenças significativas, revelando uma compatibilidade química entre a cera e o carotenóide. Com relação à toxicidade, os biofertilizantes revelaram não toxicidade nas proporções de norbixina incorporada. Porém, em relação à aplicação do biofertilizante no solo, torna-se necessário a realização de ensaios com maior duração, com tempo de contato entre solo/biofertilizante e sementes superior a 10 dias e também, com proporções maiores de norbixina no biofertilizante.

Referências

ALAGUPRATHANA, M. et al. Cytogenotoxicity assessment in *Allium cepa* roots exposed to methyl orange treated with *Oedogonium* subplagiostomum AP1. **Environmental Research**, v. 213, p. 113612, 2022.

ALOVISI, A. M. T. et al. Uso do pó de rocha basáltica como fertilizante alternativo na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e33710615599-e33710615599, 2021.

ARRAES, A.; LONGHIN, S. R. Otimização de ensaio de toxicidade utilizando o bioindicador *Allium cepa* como organismo teste. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 14, 2012.

BARROZO, M. A. S.; SANTOS, K. G.; CUNHA, F. G. Mechanical extraction of natural dye extract from *Bixa orellana* seeds in spouted bed. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 45, p. 279–282, 2013.

Bi, Q. F. **et al.** Partial replacement of inorganic phosphorus (P) by organic manure reshapes phosphate mobilizing bacterial community and promotes P bioavailability in a paddy soil**. Science Of The Total Environment,** v. 703, p. 134977, 2020.

DE MORAES, T. M. R. P. et al. Efeitos do uso da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de mistura e compactação no desempenho mecânico de misturas asfálticas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022.

DE SOUZA, G. B. et al. Potencial de uso do biofertilizante na Agricultura: uma revisão integrativa. **Agronegócio e Sustentabilidade: métodos, técnicas, inovação e gestão,** v.1, cap.1, p. 13-29, 2021.

DOS SANTOS SOUSA, M. V.; PEREIRA, T. F.; DE MACÊDO, H. R. A.; MACÊDO, M. D. O. C. Análise de testes toxicológicos *Artêmia Salina* e *Allium cepa* em membranas de quitosana com líquido da Castanha do Cajú (LCC). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 33902-33909, 2021.

DOS SANTOS, A. E. A. et al. Cellulose acetate nanofibers loaded with crude annatto extract: Preparation, characterization, and *in vivo* evaluation for potential wound healing applications. **Materials Science and Engineering: C**, v. 118, p. 111322, 2021.

DOS SANTOS, A. E. A. et al. Investigation of bioactive nanofiber-based scaffolds for cultivated meat. **Authorea Preprints**, 2022.

FIOCCO, G. et al. Compositional and morphological comparison among three coeval violins made by giuseppeguarneri “del Gesù” in 1734. **Coatings**, v. 11, n. 8, p. 884, 2021.

FONTANA, K. B. et al. Biossorção de Pb (II) por cascata de urucum (Bixa orellana) em soluções aquosas: estudo cinético, equilíbrio e termodinâmico. **Química Nova**, v. 39, p. 1078-1084, 2016.

FORMIGONI, I. Dados da importação de fertilizantes pelo Brasil de 2011 a 2020. **Farmnews**, 14 set. 2020. Disponível em: https://www.farmnews.com.br/mercado/importacao-de-fertilizantespelo-brasil. Acesso em: 15 dez. 2024.

FREITAS, C. A. S. et al. Carnauba wax p-methoxycinnamic diesters: Characterisation, antioxidant activity and simulated gastrointestinal digestion followed by *in vitro* bioaccessibility. **Food Chemistry**, v. 196, p. 1293-1300, 2016.

GUTIÉRREZ, T. J.; ALVAREZ, V. A. Properties of native and oxidized corn starch/polystyrene blends under conditions of reactive extrusion using zinc octanoate as a catalyst. **Reactive and Functional Polymers**, v. 112, p. 33-44, 2017.

GUTIÉRREZ, T. J. Effects of exposure to pulsed light on molecular aspects of edible films made from cassava and taro starch. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 41, p. 387-396, 2017.

IZIDORO, M. et al. Propriedades funcionais e organolépticas de plantas condimentares: Revisão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 6, pág. e2010614958-e2010614958, 2021.

JÚNIOR, J. J. A. et al. Analise das variáveis tecnológicas na cultura da soja (*glycinemax*) com utilização de remineralizador de solo como fertilizante. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 56835-56847, 2020.

KHIABANI, A. A. et al. Preparation and characterization of carnauba wax/adipic acid oleogel: A new reinforced oleogel for application in cake and beef burger. **Food Chemistry**, v. 333, p. 127446, 2020.

LEAL, J. G. T.; COELHO, H. J. Coordenação de Fertilizantes, Inoculantes e Corretivos (CFIC). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: www.cnpma.embrapa.br/eventos/2007/workshop/organica/download/insumos_fertilizantes.pdf. Acesso: 22 abr. 2023.

MONTEIRO, S. S. et al. Biofertilizante como bioestimulante na germinação de feijão de porco. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, n. 1, p. 9-17, 2021..

MUTHUKUMAR, T. et al. Preparation, characterization, and in vitro bioactivity of Bixa Orellana extract-impregnated collagen microspheres. **Journal of Materials Science**, v. 49, p. 5730-5737, 2014.

NETO, J. F. D. et al. New Urea Controlled-Release Fertilizers Based on Bentonite and Carnauba Wax. **Sustainability**, v. 15, n. 7, p. 6002, 2023.

PEREIRA, F. T. et al. Óleo de Buriti: índice de qualidade nutricional e efeito antioxidante e antidiabético. **Revista Virtual de Química**. V.. 14, n. 1, p. 1-100, 2020.

PINHEIRO, D. B. et al. Avaliação da Toxicidade da Ivermectina no Modelo Vegetal de *Allium cepa*. **E-Acadêmica**, v. 3, n. 2, p. e3432205-e3432205, 2022.

RODRIGUES, P. C. **Síntese, caracterização e correlações estrutura / propriedades de redes mistas de polianilina / poliuretano com arquitetura molecular pré-desenhada**. 2004. 117f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Química). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SANTOS, J. A. A.; SOUSA, M. F. A. M.; SILVA, E. L. V.; AGUIAR JÚNIOR, F. C. A. Avaliação histomorfométrica do efeito do extrato aquoso de urucum (norbixina) no processo de cicatrização de feridas cutâneas em ratos. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 16, p. 637-643, 2014.

SANTOYO, G.; OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; GOVINDAPPA, M. Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of Bacillus and Pseudomonas: a review. **Biocontrol Science and Technology**, v. 22, n. 8, p. 855-872, 2012.

SCOTTER, M. J.; THORPE, S. A.; REYNOLDS, S. L. Characterization of the principal colouring components of annatto using high performance liquid

chromatography with photodiode - array detection. **Food Additives & Contaminants, [s. l.]**, v. 11, n. 3, p. 37–41, 2015.

SKORNYAKOV, I. V.; KOMAR, V. P. IR spectra and the structure of plasticized cellulose acetate films. **Journal of Applied Spectroscopy**, v. 65, p. 911-918, 1998.

SOUSA, R. C. D. et al. Characterization and assessment of the genotoxicity and biocompatibility of poly (hydroxybutyrate) and norbixin membranes. **Acta Cirúrgica Brasileira**, v. 35, 2020.

THAKUR, D. et al. Optimization and characterization of soybean oil-carnauba wax oleogel, **LWT**, v. 157, p. 113108, 2022.

VASCONCELOS, M. C.; NETO, L. G. P.; MENEZES, A. S.; MOREIRA, F. J. C. Crescimento vegetativo de maracujazeiro sob doses de biofertilizante sólido. **Agrotrópica,** v. 31, n. 3, p. 247-254, 2019.

WEI, K et al. Effects of mineral phosphorus fertilizer reduction and maize straw incorporation on soil phosphorus availability, acid phosphatase activity, and maize grain yield in northeast China**. Archives of Agronomy and Soil Science,** v. 67, n. 1, p. 66-78, 2021.

WERMUTH, D.; TAVARES, A. C.; SCHAEFFE, R. L. Estudo reológico da influência de ceras em pebdl para o desenvolvimento de sistema aglutinante aplicado ao mpi. In: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF POWDER METALLURGY – COMEP, v. 5., 2014.

WESTFAL, E. et al. Emergência de plântulas de mamoeiro cv. Taiwam em substratos a base de misturas orgânicos. **Revista Foco** , v. 16, n. 02, pág. e1210-e1210, 2023.

WITONO, J. R. et al. The potency of norbixin as an active compound of natural dye in textile industry. **Materiais Hoje: Procedimentos** , v. S248-S254, 2022.

YUSA MARCO, D. J.et al. Characterization of colouring compounds in annatto (Bixa orellana L.) used in historic textiles by means of UV-Vis spectrophotometry and FT-IR spectroscopy. **Arché**, n. 3, p. 153-158, 2008.

ZHANG, Y.; ZHONG, Q. Probing the binding between norbixin and dairy proteins by spectroscopy methods. **Food Chemistry**, v. 139, n. 1- 4, p. 611- 616, 2013.

ZHANG, Y. et al. Long-termorganic substitution management affects soil phosphorus speciation and reduces leaching in green house vegetable production. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, p. 129464, 2021.