



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO PROFª CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

RAMÓN YURI FERREIRA PEREIRA

**PARÂMETROS BIOMÉTRICOS E PRODUTIVOS DO FEIJÃO-CAUPI EM
FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO COM LEONARDITA POTÁSSICA**

**Bom Jesus – PI
Fevereiro de 2024**

RAMÓN YURI FERREIRA PEREIRA

**PARÂMETROS BIOMÉTRICOS E PRODUTIVOS DO FEIJÃO-CAUPI EM
FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO COM LEONARDITA POTÁSSICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – PPGCA da Universidade Federal do Piauí – UFPI, na área de Ciência do Solo e linha de pesquisa Fertilidade, Biologia do Solo e Nutrição de Plantas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega

Coorientador: Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda

**Bom Jesus – PI
Fevereiro de 2024**

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco
Divisão de Representação da Informação

P436p Pereira, Ramón Yuri Ferreira.
 Parâmetros biométricos e produtivos do feijão-caupi em função da
adubação com leonardita potássica / Ramón Yuri Ferreira Pereira. –
2024.
 55 f.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, *Campus*
Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Agrárias, Bom Jesus, 2024.
 “Orientador: Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega”.

 1. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. 2. Substâncias húmicas.
3. Latossolo Amarelo. I. Nóbrega, Júlio César Azevedo.
II. Título.

CDD 635.659 2

Bibliotecária: Francisca das Chagas Dias Leite – CRB3/1004

RAMÓN YURI FERREIRA PEREIRA

**PARÂMETROS BIOMÉTRICOS E PRODUTIVOS DO FEIJÃO-CAUPI EM
FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO COM LEONARDITA POTÁSSICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Piauí, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias. Área de concentração: Ciência do Solo. Linha de pesquisa: Fertilidade, Biologia do Solo e Nutrição de Plantas.

Orientador (a): Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega.

Coorientador (a): Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda

Aprovado em 22 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR AZEVEDO NOBREGA**
Data: 15/03/2024 10:11:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega (UFRB)
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **JULIAN JUNIO DE JESUS LACERDA**
Data: 18/03/2024 14:44:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda (UFPI)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **FABIANE PEREIRA MACHADO DIAS**
Data: 15/03/2024 10:34:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Fabiane Pereira Machado Dias (UFAPE)

Documento assinado digitalmente
 **CALIANE DA SILVA BRAULIO**
Data: 15/03/2024 11:00:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Caliane da Silva Bráulio (SENAR-BA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por tudo. Pelo dom da vida, pela redenção e pela oportunidade de cursar a pós-graduação.

À minha família, por ter me dado todo o suporte e incentivo que precisei para chegar aonde cheguei.

À Igreja Adventista do Sétimo Dia (Central de Bom Jesus, Piauí), por ter me acolhido com todo carinho e amor. Foram essenciais para minha instalação e adaptação ao município de Bom Jesus, bem como pelo apoio em cada momento de minha estada na cidade. Sou grato a Deus por ter conhecido vocês!

À Hércules da Silva Gomes, por ter me ajudado a vencer meus medos, a ser alguém melhor e, principalmente, por sempre estar disposto a me ajudar nos momentos em que mais precisei de um amigo. Sempre disse isso e repito: você é uma benção!

À Diego Santos, que foi peça fundamental para que eu pudesse vencer minha ansiedade e lidar com esse mal. Ao colaborar na sua formação acadêmica, pude aprender muita coisa e isso me ajudou a lidar com minha ansiedade e ter mais paz em minha vida. Sou grato a você!

À Lauro, Mercês, Isaac e Laura, uma família maravilhosa que Deus colocou em minha vida na cidade de Bom Jesus. Obrigado por tudo que fizeram por mim.

À Igo e Karina, um casal maravilhoso que conheci em Bom Jesus. Foram maravilhosos comigo em todos os momentos. Foram usados por Deus para me alegrar em diversos momentos.

À José Janderson dos Santos Dutra, meu amigo de longa data, por ter me apoiado em meus projetos e objetivos. Foi o primeiro a saber que iria fazer o mestrado e o primeiro a me incentivar a todo instante a crescer mais profissionalmente. Obrigado!

Aos meus colegas que fiz no mestrado, Fátima, Eduardo, Ingrid, Murilo, Antônio Afonso (Tony), Claudiana, Wellinton, Gilvana, Amanda e demais. Destes, destaco Fátima, Eduardo e Murilo, vocês foram essenciais para que pudesse cumprir muitas etapas do mestrado. Sem a ajuda de vocês eu não conseguiria chegar até aqui.

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, especialmente aos prof. Dr. Júlio César de Azevedo Nóbrega e prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda, por toda paciência, colaboração e orientação. Seus conselhos estarão sempre anotados em minha vida. Suas experiências agregaram muito na minha formação.

À Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Agradeço!

*Nada temos a temer quanto ao
futuro, a menos que nos esqueçamos como
Deus tem nos conduzido no passado.*

Ellen G. White

RESUMO

O potencial da matéria orgânica em aumentar a capacidade produtiva dos solos tem motivado pesquisas para compreender sua dinâmica, especialmente de suas frações estáveis conhecidas como substâncias húmicas (SHs). Essas SHs são produtos das transformações químicas e biológicas de resíduos vegetais e animais, bem como da atividade microbiana do solo. Neste sentido, objetivou-se com a presente pesquisa avaliar a resposta do feijão-caupi sob a adição de diferentes doses de substâncias húmicas à base de leonardita potássica. A pesquisa foi conduzida entre setembro a dezembro de 2023, em casa de vegetação no Campus Professora Cinobelina Elvas, na Universidade Federal do Piauí, localizado em Bom Jesus, Piauí, Brasil. O solo utilizado no estudo foi um Latossolo Amarelo distrófico coletado na profundidade 0-0,20 m coletado no município de Bom Jesus. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com 5 tratamentos (0, 6,25, 12,5, 25 e 50 g L⁻¹ de SHs) e 5 repetições, sendo 1 planta por vaso, totalizando 25 parcelas experimentais. As SHs foram aplicadas 6 vezes diretamente no solo de cada vaso durante a condução do experimento aos 0, 10, 20, 30, 40 e 50 dias após a semeadura, após a rega do respectivo dia. Foram avaliados semanalmente a altura da planta, número de folhas e diâmetro do caule e ao término do experimento, o comprimento radicular, número de nódulos, massa de nódulos, massa seca da parte aérea e radicular e parâmetros produtivos: número de vagens por planta, número de grãos por vagem, comprimento da vagem e produtividade. Os dados foram avaliados para diagnóstico de efeito significativo e as médias foram exploradas por análise de regressão. A maioria dos parâmetros não responderam significativamente aos tratamentos. Apenas a massa seca radicular e o número de nódulos registraram significância com os tratamentos. A massa seca radicular se adequou melhor ao modelo quadrático e obteve o melhor resultado com 32,66 g L⁻¹ de SHs, com média 16,70 g por planta. O número de nódulos se comportou de modo semelhante, se adequando melhor ao modelo quadrático e obteve o melhor resultado com 25,32 g L⁻¹ SHs, alcançando média de 88,08 nódulos por planta. Por meio da análise semanal, notou-se que as SHs influenciam apenas o crescimento inicial, onde a altura da planta respondeu significativamente até aos 35 dias após a semeadura e o número de folhas registrou significância até os 42 dias após a semeadura. As SHs influenciam o desenvolvimento radicular e o número de nódulos do feijão-caupi. Recomenda-se 32,66 g L⁻¹ de leonardita potássica para obtenção de maior número de nódulo e maior desenvolvimento da massa seca radicular do feijão-caupi 'BRS Guaribas'. É necessário mais estudo para verificar o comportamento e resposta de culturas comerciais ao uso de substâncias húmicas.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata* (L.) Walp.; Substâncias húmicas; Latossolo Amarelo.

ABSTRACT

The potential of organic matter to increase the productive capacity of soils has motivated research to understand its dynamics, especially its stable fractions known as humic substances (HSs). These SHs are products of chemical and biological transformations of plant and animal residues, as well as microbial activity in the soil. In this sense, the objective of this research was to evaluate the response of cowpea to the addition of different doses of humic substances based on potassium leonardite. The research was conducted between September and December 2023, in a greenhouse at the Professora Cinobelina Elvas Campus, at the Federal University of Piauí, located in Bom Jesus, Piauí, Brazil. The soil used in the study was a dystrophic Yellow Oxisol collected at a depth of 0-0.20 m collected in the municipality of Bom Jesus. The experiment was conducted in a completely randomized design, with 5 treatments (0, 6.25, 12.5, 25 and 50 g L⁻¹ of SHs) and 5 replications, with 1 plant per pot, totaling 25 experimental plots. SHs were applied 6 times directly to the soil of each pot during the experiment at 0, 10, 20, 30, 40 and 50 days after sowing, after watering on the respective day. Plant height, number of leaves and stem diameter were evaluated weekly and at the end of the experiment, root length, number of nodules, mass of nodules, dry mass of the aerial and root parts and productive parameters: number of pods per plant, number of grains per pod, pod length and productivity. The data were evaluated to diagnose a significant effect and the means were explored by regression analysis. Most parameters did not respond significantly to treatments. Only root dry mass and number of nodules registered significance with the treatments. The root dry mass best suited the quadratic model and obtained the best result with 32.66 g L⁻¹ of SHs, with an average of 16.70 g per plant. The number of nodules behaved in a similar way, better adapting to the quadratic model and obtained the best result with 25.32 g L⁻¹ SHs, reaching an average of 88.08 nodules per plant. Through weekly analysis, it was noted that SHs only influence initial growth, where plant height responded significantly up to 35 days after sowing and the number of leaves registered significance up to 42 days after sowing. SHs influence root development and the number of nodules in cowpea. 32.66 g L⁻¹ of potassium leonardite is recommended to obtain a greater number of nodules and greater development of the root dry mass of cowpea 'BRS Guaribas'. More study is needed to verify the behavior and response of commercial crops to the use of humic substances.

Keywords: *Vigna unguiculata* (L.) Walp.; Organic fertilizer; Yellow Oxisol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) Estrutura dos ácidos húmicos (adaptado de Pope et al., 2010) e b) Estrutura dos ácidos fúlvicos (adaptado de Alvarez-Puebla et al., 2006).....	16
Figura 2 - Clima do município de Bom Jesus, Piauí, segundo a normal climatológica 1991-2020.	24
Figura 3 - Massa seca radicular de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.	31
Figura 4 - Número de nódulos em raízes de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.	33
Figura 5 - Desenvolvimento da altura da planta de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.	34
Figura 6 - Desenvolvimento do número de folhas de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.....	35
Figura 7 - Altura da planta de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.	36
Figura 8 - Número de folhas de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.	37
Figura 9 - Análise de componentes principais dos parâmetros biométricos e produtivos do feijão-caupi cultivado sob aplicação de substâncias húmicas.	40
Figura 10 - Análise de componentes principais dos indivíduos de feijão-caupi cultivado sob diferentes doses de substâncias húmicas.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química do Latossolo Amarelo distrófico.	25
Tabela 2. Doses de substâncias húmicas diluídas em água destilada e utilizadas em cada tratamento.	25
Tabela 3 - Composição química da leonardita potássica (humato de potássio).	26
Tabela 4 - Efeito de doses de substâncias húmicas nos parâmetros biométricos e produtivos de feijão-caupi.	30
Tabela 5 - Valor de p de altura da planta, diâmetro do caule e número de folhas avaliados semanalmente.	35
Tabela 6 - Equação e coeficiente de determinação de altura da planta e número de folhas de feijão-caupi cultivado sob a adição de substâncias húmicas.	36
Tabela 7 - Correlação de Pearson entre as variáveis: comprimento radicular (CR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca radicular (MSR), número de nódulos (NN), massa seca de nódulos (MN), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), comprimento da vagem (CDV), produtividade (PROD), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), altura da planta (AP) de feijão-caupi.	37
Tabela 8 – Coeficientes e variação total explanada de cada componente principal.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

S	Sul
W	Oeste
Aw	Clima de savana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
pH	Potencial hidrogeniônico
CE	Condutividade elétrica
C/N	Relação carbono/nitrogênio
PET	Politereftalato de etileno

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°	Graus
'	Minutos
''	Segundos
°C	Graus Celsius
mm	Milímetros
L	Litro
M	Metro
N	Nitrogênio
K	Potássio
Na	Sódio
G	Gramma

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1. Substâncias húmicas: Definição, origem e características gerais	15
3.2. Atuação das substâncias húmicas nos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos 17	
<i>2.2.1 Atributos físico-hídrico do solo</i>	<i>17</i>
<i>2.2.2. Atributos químicos do solo</i>	<i>18</i>
<i>2.2.3. Atributos biológicos do solo</i>	<i>19</i>
3.3. Substâncias húmicas e seus efeitos nas plantas	20
3.4. Feijão-caupi: aspectos gerais.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1. Caracterização da área experimental.....	24
3.2. Desenho experimental.....	25
3.3. Montagem e condução do experimento.....	26
3.4. Parâmetros avaliados.....	28
3.5. Análise de dados.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	43
GLOSSÁRIO	56

1. INTRODUÇÃO

A importância da adição e preservação da matéria orgânica do solo (MOS) em solos intemperizados decorre de seu baixo teor, muitas vezes associado ao baixo pH do solo devido à presença de óxidos. Em sistemas agrícolas, onde não há entrada de nutrientes externos, a MOS é a principal fonte de nutrientes, como na agricultura de subsistência no Nordeste do Brasil (TIESEN et al., 2001).

Tornou-se urgente converter os sistemas convencionais de cultivo em sistemas mais sustentáveis e preservadores do ambiente (SOFO et al., 2022). Os autores ainda ressaltam que a produção convencional de alimento (devido à inevitável falta de recursos) tem sido econômica e ambientalmente desvantajosa. Por outro lado, a agricultura orgânica (cujos benefícios e custos são controversos) nem sempre é autossustentável e durável, além de não conseguir atender a enorme e crescente demanda mundial.

Para evitar este dilema, os sistemas produtivos devem ser orientados para os princípios de uma agricultura inovadora, sustentável, regeneradora e conservadora, que inclua racionalmente as práticas tecnológicas existentes e inovadoras (SOFO et al., 2022).

O aporte de matéria orgânica exógena é considerado uma forma eficaz de melhorar a fertilidade do solo (ASHRAF et al., 2023; XUE et al., 2022; JIANG et al., 2018), pois esse material contendo carbono pode contribuir para a nutrição das plantas quando aplicado no solo (BONANOMI et al., 2020). Nesse meio-tempo, a matéria orgânica exógena é primeiro assimilada e utilizada por microrganismos do solo para se tornarem biomassa microbiana (LEHMANN; KLEBER, 2015).

Atualmente, têm-se como objetivo a mudança da gestão dos solos cultivados para apoiar métodos sustentáveis que melhoram a fertilidade do solo e reduzam a emissão de gases de efeito estufa (GERKE, 2022). Desse modo, o autor entende que métodos sustentáveis de agricultura devem ser adotados, uma vez que a gestão correta da MOS e o aumento do teor de substâncias húmicas (SHs) nos solos serão importantes para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável.

As SHs são constituintes importantes da MOS, com múltiplas funções no ambiente do solo e nas interações microbiota-solo-planta (NARDI et al., 2021). Suas propriedades e estruturas singulares são responsáveis por inúmeros efeitos nas plantas e regulam as suas respostas às mudanças ambientais, assim como os efeitos nas propriedades do solo (NARDI et al., 2021).

Tang et al. (2023) afirmam que a utilização de SHs tem sido amplamente promovida devido aos seus efeitos positivos nas propriedades do solo. Ademais, os autores afirmam que o uso de SHs ajuda a construir um reservatório de carbono no solo, o que simboliza melhoria nas suas propriedades químicas e físicas.

Atualmente, os fertilizantes inorgânicos sintéticos são um dos principais meios de aportar nutrientes no solo para plantas na agricultura (TIWARI et al., 2023). Entretanto, os autores ressaltam que embora eles aumentem a produtividade das culturas, sua utilização causa efeitos adversos diretos e indiretos na saúde do solo e tornam o agroecossistema insustentável. Desse modo, é importante promover a aplicação de substâncias naturais para restaurar a qualidade do solo e desenvolver agroecossistemas sustentáveis.

Com o aumento populacional, tornou-se uma preocupação a oferta e a qualidade de alimentos nutritivos, especialmente para os países em desenvolvimento. Os vegetais ricos em proteínas são uma alternativa para uma nutrição adequada às famílias de baixa renda com acesso limitado à proteína animal (JAYATHILAKEA et al., 2018).

Uma alternativa que tem se mostrado importante para esse fim é o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), pois apresenta características importantes para o consumo humano, já que é uma boa fonte de minerais, como ferro e zinco; contém fibras solúveis e insolúveis; baixos teores de fatores antinutricionais (taninos e ácido fítico); considerável teor de carboidratos, além de se destacar pela qualidade do cozimento (OLIVEIRA et al., 2023).

Desse modo, objetivou-se com a presente pesquisa avaliar a resposta do feijão-caupi e a fertilidade do solo sob a adição de diferentes doses de substâncias húmicas (ácidos húmicos e fúlvicos) à base de leonardita potássica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Substâncias húmicas: Definição, origem e características gerais

O húmus e a matéria húmica são distintos dos detritos orgânicos (resíduos orgânicos mal decompostos) em suas características morfológicas, químicas e funcionais. O húmus é composto por um complexo de biomoléculas iniciais de tecidos vegetais e animais, produtos de sua degradação e transformação e produtos de síntese extracelular. Isso forma um sistema dinâmico de natureza coloidal estabilizado por interações covalentes, iônicas e intermoleculares (ZAVARZINA et al., 2021).

As substâncias húmicas (SHs) são misturas heterogêneas e complexas, formadas e distribuídas no meio ambiente como resultado da reciclagem do carbono durante a vida e a morte dos organismos vivos (LEE et al., 2019). Compreendem cerca de 60% da matéria orgânica no solo do mundo (CANELLAS et al., 2015), sendo o principal constituinte do fertilizante orgânico. As SHs são classificadas em ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e huminas (HU) com base em suas propriedades físico-químicas, peso molecular e solubilidade (RAGURAJ et al., 2022).

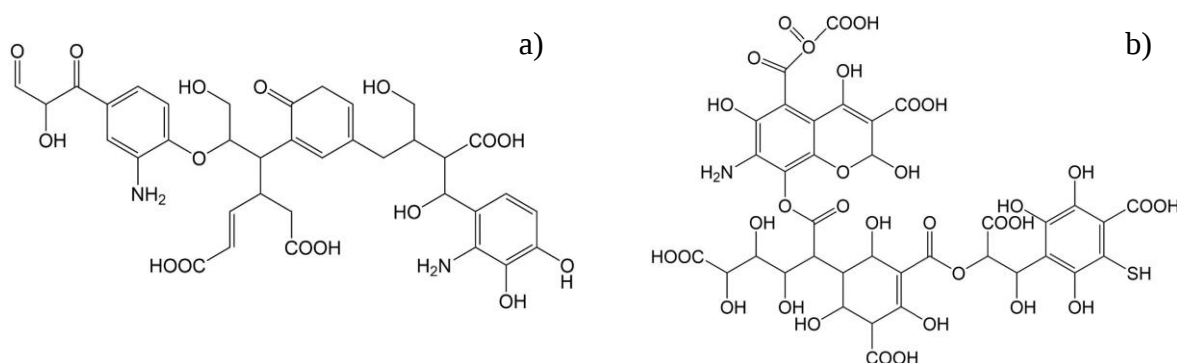
As SHs podem ser produzidas por meio da reciclagem de resíduos orgânicos através da compostagem aeróbica e, posteriormente, aplicadas em solos a fim de aproveitar ao máximo os compostos funcionais na forma de SHs (GUO et al., 2019). Sua formação pode ser afetada por parâmetros físico-químicos, incluindo o tipo de matérias-primas, aditivos de composto, atividade microbiana, temperatura, pH, relação C/N, teor de oxigênio e tamanho de partícula (PETRIC et al., 2012; SILVA et al., 2014).

As SHs são partículas pequenas (GUO et al., 2019). Segundo Guo et al. (2016) o tamanho médio das partículas de SHs oriundas de esterco bovino e composto de lama prensada de cana-de-açúcar estão entre 300 e 600 nm. No entanto, por causa da complexidade das matérias-primas, comunidades microbianas, parâmetros ambientais, tempo de transformação e propriedades polidispersivas das SHs, é difícil estabelecer uma estrutura definitiva destes compostos (STEVENSON, 1994).

Entretanto, do ponto de vista qualitativo, todas as SHs representam os mesmos tipos de grupos funcionais e arranjos estruturais (VETVICKA et al., 2010). As SHs associam pequenas moléculas e outros polímeros heterogêneos por meio de interações hidrofóbicas (isto é, van der Waals, π - π e CH- π) e ligações de hidrogênio (LIU et al., 2011; CANELLAS et al., 2015), o que resulta em SHs com peso molecular de 500–1.000.000 Da (CALVO et al., 2014).

Nas SHs os AH existem como supramoléculas com peso molecular de 10.000–100.000 Da, enquanto os AF têm moléculas com baixo peso molecular, normalmente entre 600 e 1500 Da (DIALLO et al., 2003). Modelos estruturais de AH e AF monoméricos baseados no modelo Temple-Northeastern-Birmingham (TNB) são mostrados na Figuras 1.

Figura 1 - a) Estrutura dos ácidos húmicos (adaptado de Pope et al., 2010) e b) Estrutura dos ácidos fúlvicos (adaptado de Alvarez-Puebla et al., 2006).



Segundo esses modelos, os grupos hidrofílicos em estruturas de AH e AF estão no exterior da estrutura, incluindo grupos carboxílicos e fenólicos. Cadeias alifáticas e anéis aromáticos constituem as frações hidrofóbicas das SHs (LODYGIN; ABAKUMOV, 2022). Os grupos carboxílicos, fenólicos e amino são os grupos funcionais mais prevalentes nas SHs, e os grupos carboxílicos e fenólicos são as principais substâncias que compõem sua acidez total (MELO et al., 2016). Destaca-se que os AH têm um grau aromático mais elevado que os AF; no entanto, os AF apresentam maior teor de grupos carboxila e fenólicos e, portanto, maior acidez total (JINDO et al., 2016; LODYGIN; ABAKUMOV, 2022).

Do ponto de vista estrutural, as SHs têm um padrão único que é diferente de qualquer composto do solo, e a sua composição química pode bem representar a da MOS (GARCÍA et al., 2019; OLK et al., 2019; DOU et al., 2020).

Os efeitos das SHs são atribuídos principalmente aos grupos carboxílicos e fenólicos, quinonas e outros grupos funcionais, que além dos benefícios já citados anteriormente, também reduzem os riscos de eutrofização ambiental associados ao uso excessivo de fertilizantes químicos (GUO et al., 2019). Estudos tem relatado os benefícios agrônômicos das SHs na formação de agregados, aumento da porosidade do solo, disponibilidade de nutrientes e capacidade de retenção de água (GUO et al., 2016; VOLIKOV et al., 2016) para as culturas (TAHIR et al., 2011).

Além disso, as SHs são úteis como pesticidas naturais, porque podem suprimir vários fitopatógenos transmitidos pelo solo e minimizar a toxicidade de produtos químicos (MEHTA et al., 2014). Esses benefícios são atribuídos a vários grupos funcionais presentes na composição das SHs, incluindo grupos carboxílicos, fenólicos, hidroxílicos e quinonas (GUO et al., 2016). Com isso, as SHs são importantes para a compreensão de sua atividade semelhante ao hormônio (NARDI et al., 2017) ou nas propriedades edáficas.

3.2. Atuação das substâncias húmicas nos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos

Substâncias húmicas, a exemplo de outros condicionadores de solo, têm sido amplamente estudadas (CUNHA et al., 2015) visando o aumento da matéria orgânica do solo, a melhoria na disponibilidade de nutrientes e de outros atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com efeitos diretos ou indiretos no desenvolvimento das plantas. Do ponto de vista químico, as SHs ativam a solubilização de compostos inorgânicos no solo através da formação de complexos húmico-metálicos, bem como o aumento da solubilidade dos compostos metálicos durante a sua redução (RASHAD et al., 2022).

2.2.1 Atributos físico-hídrico do solo

Substâncias orgânicas podem favorecer o aumento da estabilidade de agregados, de acordo com seu grau de hidrofobicidade e velocidade de infiltração de água nos agregados. Bastos et al. (2005), ao estudarem a formação e estabilização de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em virtude da adição de compostos orgânicos com características hidrofóbicas e hidrofílicas distintas, verificaram que a aplicação de moléculas orgânicas (como AH) foi capaz de melhorar a agregação de solos com grau de intemperismo avançado.

Corroboram com essa afirmação os estudos de Fontana et al. (2010) ao verificarem a melhoria da agregação do solo proporcionada pelo uso de SHs. Os autores afirmam que as HU promovem maior agregação em Argissolos Amarelos, enquanto os AF proporcionam maior agregação em Latossolos Amarelos.

No geral, a melhoria na agregação do solo, proporcionada pelas SHs são refletidas em outros atributos físicos do solo, como a densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica. Além de possibilitar maior agregação do solo e consequente melhoria de sua estrutura, a adição de compostos orgânicos favorece o aumento da porosidade do solo e da

condutividade hidráulica, ao mesmo tempo que diminui a densidade do solo (GUO et al., 2016; VOLIKOV et al., 2016).

É possível verificar também os efeitos da SHs na melhoria da estrutura do solo em locais de mineração. Miranda et al. (2021) observaram que as SHs reduziram a erodibilidade dos solos em áreas de mineração de rochas ornamentais. Isto evidencia o potencial das SHs na estruturação do solo, se mostrando uma solução promissora para combater a erosão em áreas degradadas pela mineração de rochas ornamentais.

Dentre esses outros atributos beneficiados pelas SHs pode se destacar a sua influência na capacidade de retenção de água (KUČERÍK et al., 2012; CIHLÁŘ et al., 2014). Em solos agrícolas, a água é um meio importante para o transporte de nutrientes, elementos essenciais aos processos de fotossíntese, respiração e transpiração das culturas.

Segundo Kučerík et al. (2012) nas estruturas das SHs, os domínios hidrofóbicos são cercados por porções hidrofílicas, que podem formar uma estrutura hidrofóbica por meio de interações fracas não específicas. Cihlár et al. (2014) empregaram um método de reticulação de formaldeído para aumentar a porosidade dos AH, mostrando um aumento de três vezes na capacidade de retenção de água dos produtos.

Com isso, segundo os autores, essa porosidade da matriz húmica pode ser utilizada como parâmetro para avaliar a capacidade de retenção de água, embora deva ser destacado que, além da porosidade da matriz húmica, a capacidade de retenção de água é também determinada pela quantidade de grupos funcionais presentes nas SHs (LODYGIN; ABAKUMOV, 2022). Segundo Zhang et al. (2014) a capacidade de retenção de água foi aumentada com a adição de AH devido aos seus grupos hidrofílicos.

2.2.2. Atributos químicos do solo

A aplicação de AHs derivados de materiais compostados pode aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (CAMPITELLI; CEPPI, 2008), bem como favorecer o aumento do teor de nutrientes (SHARMA et al., 2015), como consequência, em parte, da redução na lixiviação de nutrientes (ZHANG et al., 2014).

Neste estudo, é mostrado que a remediação de um solo contaminado com multimetálicos (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr) de reação subalcalina pode ser obtida de forma eficiente lavando o solo com soluções de substâncias húmicas. Porém, também descobrimos que a extensão da remoção de metais é função da composição molecular da matéria húmica empregada na lavagem do solo.

As SHs podem também quelar ou construir formas complexas com cátions metálicos (incluindo Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+}) influenciando assim na solubilidade de nutrientes importantes para as plantas (TAHIR et al., 2011). Isto pode ser atribuído à presença de grupos funcionais na estrutura das SHs, que podem reagir rapidamente com cátions polivalentes na superfície das partículas de argila, formando complexos húmus-metal-argila (LODYGIN; ABAKUMOV, 2022).

As SHs atuam fortemente na mitigação de estresses gerados por elementos tóxicos, como arsênio no arroz (HASANUZZAMAN et al., 2024). Conclusivamente, as descobertas atuais sugeriram que BC e HA eram excelentes alterações orgânicas para aliviar o estresse oxidativo induzido por arsênio, mas o BC foi mais eficaz na manutenção dos equilíbrios redox e no aumento do sistema de defesa antioxidante nas plantas.

A aplicação de BC e HA isoladamente ou em combinação seria uma formulação ecologicamente correta para a fitorremediação de As ou uma excelente abordagem para a produção de arroz em solos afetados por As.

Segundo Boostani et al. (2023), as SHs podem auxiliar na biodisponibilidade de zinco (Zn) no solo. Os autores, ao avaliar o efeito da aplicação individual e combinada de AH com inúmeros resíduos de culturas, vinagre de madeira e biochar nas frações químicas do Zn do solo, concluíram que a aplicação combinada de AH e resíduo de algodão melhorou a biodisponibilidade do Zn do solo, a captação de Zn e o rendimento da matéria seca de mudas de laranja azeda em solo calcário.

Destaca-se também que, além da retenção e solubilização dos nutrientes, as SHs contêm quantidades significativas de nutrientes, como nitrogênio (N) e enxofre (S), que podem ser usados como suporte nutricional para culturas hortícolas (CANELLAS et al., 2015).

2.2.3. Atributos biológicos do solo

O uso de SHs pode promover a diminuição do estoque de carbono total (DIAS et al., 2023), pois a adição de uma fonte de carbono facilmente degradável ao solo pode intensificar o processo de decomposição do carbono já presente no solo, resultando no aumento da disponibilidade de energia e nutrientes necessários para que os microrganismos decomponham a matéria fornecida. Esse fenômeno é conhecido como 'efeito *priming*' (LIU et al., 2019).

Embora os mecanismos que promovem o efeito *priming* ainda sejam pouco compreendidos devido à sua complexidade, frequentemente se sugere que incluem ativação microbiana, estequiometria e limitação de nitrogênio (PERVEEN et al., 2019). Como os

microrganismos desempenham um papel fundamental na decomposição da matéria orgânica do solo, a sua população no solo tem influência direta sobre o efeito *priming*.

Além disso, a relação entre carbono e nitrogênio nos resíduos adicionados assume um papel de significância no processo de decomposição, uma vez que uma relação carbono/nitrogênio elevada estimula a degradação do carbono nativo (LIU et al., 2019).

Pesquisa realizada por Blagodatskaya et al. (2007) afirmaram que o aporte de substâncias orgânicas disponíveis no solo ocasiona uma acentuada rotatividade de matéria orgânica nativa, causando assim, o efeito *priming*. Fontaine et al. (2003) observaram que o aporte de nutrientes e energia, por meio de matéria orgânica fresca, gera o aumento da atividade microbiana. Isso também foi observado por Chen et al. (2014), onde perceberam que o acréscimo de matéria orgânica no solo pode proporcionar uma intensificação ou retardação da decomposição da matéria orgânica, causando um efeito *priming* positivo ou negativo (Chen et al., 2014).

Portanto, pode-se concluir que a aplicação de SHs poderia aumentar a quantidade de microrganismos do solo e sua viabilidade, representada por reações fisiológicas e atividades respiratórias (HAMMERSCHMIEDT et al., 2021). Com isso, os autores concluíram que a co-aplicação de substâncias húmicas e biocarvão tem efeito positivo na fertilidade, qualidade e saúde do solo.

3.3.Substâncias húmicas e seus efeitos nas plantas

As SHs são as principais categorias de bioestimulantes vegetais que podem ser aplicados diretamente às culturas em baixa concentração para melhorar a aquisição de nutrientes, o crescimento radicular e aéreo, bem como o rendimento das plantas (VAN OOSTEN et al. 2017). Nos últimos anos, muitos estudos têm demonstrado como as SHs e suas frações afetam positivamente as vias metabólicas primárias e secundárias das plantas em estudos de laboratório e de campo (NARDI et al., 2017).

O principal efeito das SHs está relacionado ao sistema radicular, ao atuarem de modo semelhante aos fitormônios (SILVA et al., 2023). Neste sentido, as SHs proporcionam a indução da raiz lateral e o crescimento dos pêlos radiculares, que podem ser promovidos por mudanças nas vias energéticas e de nitrogênio e no transporte através das membranas das raízes (BALDOTTO; BALDOTTO, 2014; GERKE, 2021). Isso ocorre uma vez que as SHs de diferentes pesos moleculares podem ser absorvidas pelas raízes e translocadas para outras partes da planta (NARDI et al., 2017).

Outro fator importante é que as SHs promovem o aumento das massas seca e fresca da raiz (ZHU; WAKISAKA, 2021; FAN et al., 2022; POPA et al., 2022). Os dados obtidos revelaram que o crescimento da planta em resposta à aplicação de SHs mostrou um aumento geral de 22% na massa seca da parte aérea e 21% na massa seca radicular, independentemente do tipo de planta, fonte húmica e concentração (ROSE et al., 2014).

Desse modo, as SHs podem promover a manutenção do desenvolvimento vegetal para permitir o aumento da tolerância ao estresse, atuando no desempenho da planta em condições de estresse ambiental, bem como as melhores nas propriedades biológicas do solo (SILVA et al., 2022).

Ao testarem o uso de SHs com adubação nitrogenada no cultivo de beterraba (MOSAAD et al., 2022), observaram que tanto as SHs adicionadas ao solo quanto os fertilizantes minerais nitrogenados têm um grande impacto nos rendimentos de recuperação da cobertura do solo, raízes e açúcar. Os maiores valores de produção de raízes foram com AH no solo com 213 kg N ha⁻¹. Por outro lado, o AH no solo e o AF com 213 kg N ha⁻¹ aumentaram a produção de açúcar recuperável da beterraba sacarina em 16,1 e 15,2%, respectivamente. Portanto, é preferível usar AH no solo a 30 kg ha⁻¹ com 213 kg N ha⁻¹ para obter o maior rendimento de raízes e do rendimento de açúcar extraído (MOSAAD et al., 2022).

Estudo conduzidos por Nardi et al. (2000) revelaram que os AH podem promover a absorção de Na, Ba e P nas plantas e modificar o pH do solo ao redor da raiz, estimulando a atividade da H⁺-ATPase nas raízes das plantas. Do mesmo modo, Sá et al. (2023) afirmam que SHs influenciam o crescimento das mudas de milho, com destaque para o AH, que gerou as alterações mais significativas no sistema radicular do milho. Tahir et al. (2011) descobriram que o maior aumento na altura das plantas e no peso da parte aérea ocorreu quando os AH estavam na concentração de 60 mg ha⁻¹ de solo. Esse avanço ocorreu em função da atuação das SHs ao aumentar a permeabilidade da membrana celular, o que pode aumentar a absorção e acumulação de nutrientes (TAHIR et al., 2011; MAJI et al., 2017). Relatos de efeitos positivos de AH no crescimento de trigos, plantas ornamentais, ervilhas e muitas outras plantas economicamente valorizadas, também têm sido verificados (TAHIR et al., 2011; ZHANG et al., 2014; MAJI et al., 2017).

Com isso, é possível constatar que a aplicação de SHs pode melhorar o enraizamento, crescimento de mudas e uso de nutrientes pelas plantas, o que as tornam ideais para uso no lugar de reguladores sintéticos de crescimento de plantas.

Por outro lado, o uso de SHs associadas à adubação mineral em culturas hortícolas não obteve bons resultados. Azevedo et al. (2021) observaram que o uso de SHs associado a

adubação mineral não promoveu aumento significativo nos teores de cálcio, magnésio, ferro e fósforo na folha de alface, na área foliar, nem no peso fresco dessa hortícola.

Portanto, as SHs embora tenha se mostrado eficiente na formação de raízes e no crescimento das plantas de muitas culturas, ainda são necessários mais estudos com diferentes formas de aplicação e doses (RITTER et al., 2023), para que seu uso venha a se tornar uma prática bastante difundida no meio agrônomo.

A presença de grupos fenólicos cria uma superfície hidrofóbica que permite que as SHs realizem interações sortivas com os diversos poluentes presentes no solo. As SHs também ajudam na assimilação do C atmosférico (ou seja, no sequestro de C), ajudando a regular o impacto das mudanças climáticas nos agroecossistemas (TIWARI et al., 2023). Assim, a adição de MO preparado através de biodegradação (compostagem ou vermicompostagem) ao solo aumentaria a fertilidade do solo e a produtividade das plantas e diminuiria a concentração de CO₂ atmosférico (TIWARI et al., 2023).

3.4. Feijão-caupi: aspectos gerais

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma leguminosa herbácea originária do continente africano pertencente à família *Fabaceae*, que é amplamente difundida em países em desenvolvimento (JAYATHILAKE et al., 2018). O feijão-caupi é conhecido popularmente no Brasil como feijão-de-corda, feijão-miúdo ou feijão-macassar. Essa espécie se destaca pelo ciclo curto (60 a 90 dias), hábito de enraizamento profundo, forte sensibilidade estomática e ajuste osmótico, tornando-o relativamente tolerante à seca e altas temperaturas (CARVALHO et al., 2017; CAMARA et al., 2018).

Essas particularidades fazem com que essa cultura seja uma fonte de renda valiosa para agricultores em regiões semiáridas (BOUKAR et al., 2019). Nessas áreas, o feijão-caupi é cultivado principalmente por pequenos agricultores e famílias rurais, que o utilizam como uma fonte de proteína acessível (CAMPOS et al., 2023). Devido à sua natureza precoce e resistente, é uma planta bem adaptada às condições do semiárido e frequentemente é cultivada em áreas de sequeiro (SOUSA et al., 2014).

A produção de feijão-caupi no Brasil no ano agrícola 2022-2023 foi aproximadamente 561.200 toneladas, com produtividade média de 466 kg ha⁻¹, produzida principalmente por pequenos produtores (CONAB, 2023). A cultura possui uma significativa importância socioeconômica, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, sendo os principais estados produtores o Piauí, Ceará, Bahia e Pernambuco (DUTRA et al., 2015; CONAB, 2023).

A obtenção de uma produtividade satisfatória dessa cultura depende de uma série de fatores, entre eles está o uso eficaz de recursos tecnológicos, ambientais e de manejo (BEZERRA et al., 2014). No entanto, apesar de seu potencial produtivo, a produtividade média do feijão-caupi é considerada baixa devido à falta de nutrientes no solo e à carência de práticas adequadas de manejo da cultura (SANTOS et al., 2017).

Portanto, a fertilidade do solo surge como um fator restritivo para o aumento da produtividade agrícola do feijão-caupi. Desse modo, é importante reavaliar os sistemas de produção convencionais em busca de maior sustentabilidade (econômica e ecologicamente), com o intuito de reduzir despesas e otimizar o uso de recursos.

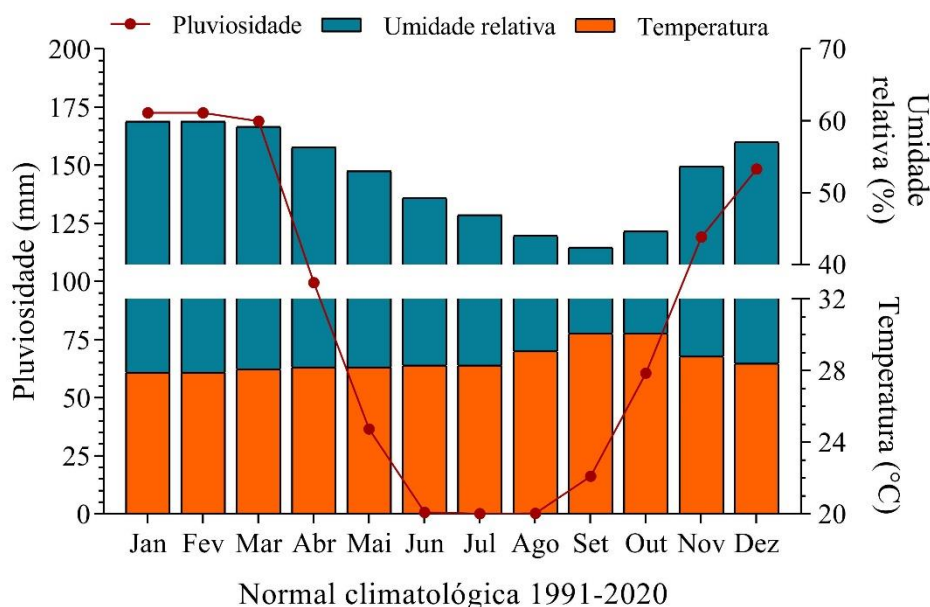
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

A pesquisa foi realizada no período de 18 de setembro a 5 de dezembro de 2023, em casa de vegetação com 50% de redução da luminosidade no Campus Professora Cinobelina Elvas (CPCE), da Universidade Federal do Piauí (UFPI), localizado em Bom Jesus, Piauí, Brasil (09° 04' 28'' S e 44° 21' 31'' W, com altitude de 277 m).

O padrão climático da região - segundo Köppen - é do tipo Aw, caracterizado como clima de savana, com uma estação mais seca no inverno (HOLANDA; MEDEIROS, 2019), com o mês mais seco apresentando precipitação inferior a 60 mm, equivalendo a menos de 4% da precipitação anual total. O município possui verões quentes e alta pluviosidade de novembro a abril, e inverno com uma estação seca que vai de maio a outubro, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 3).

Figura 2 - Clima do município de Bom Jesus, Piauí, segundo a normal climatológica 1991-2020.



A temperatura média anual é de 26,5 °C, com índices pluviométricos anuais variando de 900 a 1.200 mm. Segundo dados fornecidos por estações do INMET, a precipitação variou de 0 a 24 mm, a temperatura variou de 18,2 a 41,8 °C e a umidade relativa do ar de 8 a 84,9% durante o período experimental (Figura 3).

Foi utilizado o horizonte A do solo classificado como Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (SANTOS et al., 2018), Ferralsol na classificação WRB/FAO e Oxisol na Soil Taxonomy. O LAd foi coletado no município de Bom Jesus, Piauí, Brasil, e suas características químicas foram analisadas no Centro de Análises de Solo do CPCE (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise química do Latossolo Amarelo distrófico.

pH	4,14
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,28
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,00
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,53
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,08
K (cmol _c dm ⁻³)	0,04
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,65
T (cmol _c dm ⁻³)	2,93
P (mg dm ⁻³)	3,40
Cu (mg dm ⁻³)	0,07
Mn (mg dm ⁻³)	3,75
Fe (mg dm ⁻³)	88,0
Zn (mg dm ⁻³)	0,30
V%	22,3
m%	60,5
MO (g kg ⁻¹)	9,13

pH: potencial hidrogeniônico. H: hidrogênio. Al: alumínio. K: potássio. SB: soma de bases. T: CTC potencial. P: fósforo. Cu: cobre. Mn: manganês. Fe: ferro. Zn: zinco. V%: saturação de bases. m%: saturação por alumínio. MO: matéria orgânica.

3.2. Desenho experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, utilizando 5 tratamentos, conforme Costa et al. (2020) (Tabela 2) e 5 repetições, sendo 1 planta por vaso, totalizando 25 parcelas experimentais. As SHs foram aplicadas 6 vezes diretamente no solo de cada vaso durante a condução do experimento aos 0, 10, 20, 30, 40 e 50 dias após a semeadura (DAS), nos horários das 7:00 (GMT – 03h00, horário local), após a rega do respectivo dia.

Tabela 2. Doses de substâncias húmicas diluídas em água destilada e utilizadas em cada tratamento.

Tratamentos	D _{SH}
-------------	-----------------

T1	00,00 g L ⁻¹
T2	06,25 g L ⁻¹
T3	12,50 g L ⁻¹
T4	25,00 g L ⁻¹
T5	50,00 g L ⁻¹

T1: testemunha. T2: tratamento 2. T3: tratamento 3. T4: tratamento 4. T5: tratamento 5. D_{SH}: doses de substâncias húmicas.

3.3. Montagem e condução do experimento

Foram utilizados vasos de polietileno (polímero de adição produzido a partir de etileno) com volume de 13 L para cultivo da *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Foram feitas 5 perfurações na parte inferior de cada vaso utilizando um ferro de solda, a fim de garantir a drenagem da água de irrigação. Os vasos foram colocados em 2 bancadas de madeira, a uma altura de 0,75 m do chão e dispostos em 5 fileiras de 5 vasos (Figura 1), contendo os respectivos tratamentos (Tabela 2). As sementes de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. ‘BRS Guaribas’ foram obtidas com um produtor local do município de Caxias, Maranhão, Brasil.

A fonte de SHs utilizada na presente pesquisa foi um fertilizante organomineral em pó à base de leonardita potássica (humato de potássio) (Tabela 3).

Tabela 3 - Composição química da leonardita potássica (humato de potássio).

Composição	Teores
pH	6,89
CE	0,82
Umidade	12%
N	0,77%
K	2,45%
Na	0,27%
Carbono orgânico oxidável	37,74%
Ácidos húmicos	22,04%
Ácidos fúlvicos	10,28%
C/N	49,01

A leonardita potássica foi diluída em água destilada e armazenada em recipientes de politereftalato de etileno (PET) (densidade: 1,36 g cm⁻³), conforme os respectivos tratamentos (Tabela 2). Em seguida, os recipientes PET contendo as SHs foram identificados conforme suas respectivas concentrações e armazenados em temperatura ambiente a sombra.

O LAd foi peneirado em peneira com malha de 4 mm para desagregar e facilitar a homogeneização do solo, além de retirar galhos, folhas e qualquer resquício de pedregosidade. Em seguida, foi realizada a correção da acidez e adubação orgânica (utilizando esterco caprino coletado no CPCE).

A necessidade de calagem foi calculada utilizando o método da saturação por bases (equação 1), utilizando o manual Recomendações para Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais – 5º aproximação, elaborado pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999).

$$\text{Necessidade de calagem (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{(V_2 - V_1) \times \text{CTC}_{\text{potencial}}}{\text{PRNT}} \quad (1)$$

Onde, V_2 – saturação de bases desejada, V_1 – saturação de bases atual, $\text{CTC}_{\text{potencial}}$ – capacidade de troca catiônica, PRNT – poder relativo de neutralização total.

Em seguida, a necessidade de calagem foi convertida para quantidade de calcário por vaso, por meio da equação 2.

$$\text{QC (g vaso}^{-1}\text{)} = \frac{\text{NC (t ha}^{-1}\text{)}}{2} \times \text{capacidade do vaso (L)} \quad (2)$$

Onde, QC – quantidade de calcário por vaso, NC – necessidade de calagem.

A necessidade de calagem recomendada foi de 1,39 t ha⁻¹ utilizando calcário dolomítico com PRNT de 85%, que correspondeu a aproximadamente 9,1 g vaso⁻¹.

O solo de cada unidade experimental foi colocado em seu respectivo vaso, juntamente com o calcário, homogeneizado e umedecido até a capacidade de campo. Após o período de reação do calcário no solo, foi realizado o plantio onde foram semeadas três sementes de feijão-caupi ‘BRS Guaribas’, sendo realizado o desbaste no décimo dia após a emergência, permanecendo uma planta por vaso. A rega foi feita utilizando regador manual de 5 L, sendo uma vez por dia, às 7h00 (GMT – 03h00, horário local).

Durante a condução do experimento houve o aparecimento de insetos como *Bemisia tabaci*, *Aphis gossypii*, *Diabrotica speciosa* e *Exochomus sp* e membros da família *Formicidae*, bem como plantas daninhas. O controle fitossanitário foi realizado utilizando arranquio de plantas daninhas e bioprotetor natural a base de azadiractina. O bioprotetor natural foi feito utilizando óleo de neem (*Azadirachta indica*) a 2% diluído em água destilada. Foi adicionado detergente neutro a 1% na formulação do bioprotetor para atuar como adjuvante surfactante.

No total foram feitas 3 aplicações de bioprotetor natural no aparato foliar do feijão-caupi, com um intervalo de 7 dias entre cada aplicação.

3.4. Parâmetros avaliados

Os dados biométricos da parte aérea do feijão-caupi ‘BRS Guaribas’ foram analisados semanalmente, sendo a primeira avaliação realizada aos 7 DAS, onde foram coletados os seguintes dados: i) altura da planta (AP, cm): mensurada com auxílio de fita métrica graduada em milímetros; ii) número de folhas (NF, por planta): mensurado por meio de contagem manual de folhas trifolioladas ao se expandirem e; iii) diâmetro do caule (DC, mm): obtido com o uso de paquímetro digital.

Ao término do experimento (estágio fenológico R9 – maturação), foi realizada a última avaliação biométrica, onde foram mensuradas a biometria da parte aérea e do sistema radicular, bem como suas respectivas massas secas. Nesse momento foi mensurado o comprimento radicular (CR, cm), obtido por meio de fita métrica graduada em milímetros. Já as massas secas foram determinadas pelo método de secagem em estufa, utilizando sacos de papel Kraft, em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C até atingirem peso constante e posterior pesagem em balança analítica com precisão de 0,0001 g.

Os parâmetros produtivos mensurados (estádio fenológico R9) foram: i) número de vagens por planta (NVP), obtido pela contagem manual das vagens; ii) número de grãos por vagem (NGV), obtido pela contagem manual dos grãos; iii) comprimento da vagem (CDV), mensurado com auxílio de fita métrica graduada em milímetros; iv) produtividade (PROD, t ha⁻¹), obtido pela equação 3:

$$\text{Produtividade de grãos (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{60 \times \text{NVP} \times \text{NGV} \times \text{Massa de 1000 grãos}}{60.000} \quad (3)$$

Foram analisados também o número de nódulos (NN, por planta), mensurado pela retirada dos nódulos do sistema radicular e posterior contagem manual dos nódulos; além da massa fresca de nódulos (MN, mg), obtida por meio da pesagem dos nódulos em balança analítica (0,0001 g).

3.5. Análise de dados

Os dados obtidos foram submetidos ao teste Shapiro-Wilk e Bartlett para verificação da normalidade dos resíduos e a homocedastidade, respectivamente, por meio de um Modelo Linear Generalizado (MLG), segundo o modelo estatístico da equação 4.

$$Y_{ij} = \mu + A_i + e_{ij} \quad (4)$$

Onde, Y_{ij} = valor observado para variáveis; μ = efeito da média geral; A_i = efeito do tratamento (substâncias húmicas); e e_{ij} = erro experimental.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para diagnosticar significância por meio do teste F. Quando constatado efeito significativo para os tratamentos, os dados foram explorados por meio de análise de regressão, verificando a significância dos efeitos linear ($b + ax = 0$) e quadrático ($c + bx + ax^2 = 0$), e o coeficiente de determinação (R^2) para definição do melhor modelo matemático.

Também foi realizada a análise de componentes principais (ACP). Inicialmente, foi padronizado o conjunto de dados composto pelas médias das variáveis de cada tratamento ($\mu = 0$; $s^2 = 1$), visando eliminar a influência das diferentes unidades de medida das variáveis. Em seguida, foi elaborado um biplot para análise de correlações e tendências multivariadas.

Os testes e análises relevantes foram realizados no software estatístico R (R CORE TEAM 2019) utilizando os pacotes 'ExpDes.pt' e 'FactoShinny', adotando-se um limite de $p < 0,05$ para os testes realizados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso de SHs atua no sistema radicular e biometria do feijão-caupi. De acordo com resumo da Anova (Tabela 4), os parâmetros massa seca radicular (MSR) e número de nódulos (NN) registraram significância ($p < 0,05$) para as doses de SHs testadas. Já os demais parâmetros (biométricos e produtivos) não obtiveram efeito significativo ($p > 0,05$) com os tratamentos.

Tabela 4 - Efeito de doses de substâncias húmicas nos parâmetros biométricos e produtivos de feijão-caupi.

Variáveis	Doses de substâncias húmicas (g L ⁻¹)					EPM ¹	<i>p</i> -valor ²		
	0,0	6,25	12,5	25,0	50,0		Linear	Quadrático	
<i>Parâmetros biométricos</i>									
Altura da planta (cm)	53,52	64,8	72,66	74,38	65,42	4,03	0,2082	0,4462	
Número de folhas (por planta)	11,20	12,40	13,00	13,20	11,60	0,33	0,1112	0,1744	
Diâmetro do caule (mm)	7,989	6,667	7,320	8,903	8,212	0,27	0,3112	0,0623	
Massa seca da parte aérea (g)	14,12	14,24	16,68	17,36	18,73	0,54	0,2736	0,1168	
Massa seca radicular (g) ³	11,06	12,58	14,84	16,32	15,16	0,69	0,1094	0,0019	
Comprimento radicular (cm)	35,62	47,96	47,94	55,26	47,18	2,31	0,1012	0,4000	
Número de nódulos (por planta) ⁴	25,05	36,20	77,60	87,62	22,63	9,20	0,1888	0,0330	
Massa de nódulos (mg)	363,0	464,0	787,5	1.413	1.032,4	0,15	0,7751	0,0934	
<i>Parâmetros produtivos</i>									
Número de vagens (por planta)	1,4	1,4	1,6	1,2	1,6	0,14	0,9999	0,9999	
Número de grãos (por vagem)	9,6	10,2	9,8	10,6	10,62	0,51	0,6066	0,6631	
Comprimento da vagem (cm)	17,27	17,79	17,62	18,97	17,98	0,42	0,6611	0,3646	
Produtividade (t ha ⁻¹)	3,39	5,03	4,87	3,24	4,23	0,21	0,1984	0,5977	

¹ EPM = erro padrão da média

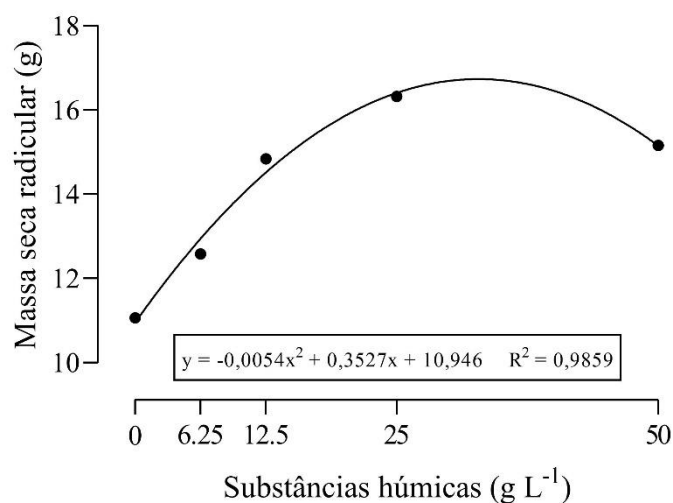
² Significante pelo teste F

³ $\hat{y} = -0,0054x^2 + 0,3527x + 10,946$ $R^2 = 0,9859$

⁴ $\hat{y} = -0,1064x^2 + 5,3884x + 19,36$ $R^2 = 0,9322$

Observando a MSR (Figura 4), verificou-se que houve efeito quadrático (Tabela 4), onde o melhor resultado (16,70 g) foi obtido com a dose 32,66 g L⁻¹ SHs, correspondendo a um acréscimo de 51,04% em comparação com o resultado (11,06 g) do tratamento testemunha (0 g L⁻¹ SHs).

Figura 3 - Massa seca radicular de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.



Esse resultado é oriundo da atuação dos grupos funcionais das SHs no sistema radicular que promovem o desenvolvimento do sistema radicular das plantas através de biomoléculas com atividade auxínica (COSTA et al., 2020). Isso afeta diretamente a morfologia radicular, aumentando o comprimento e o número de pêlos radiculares através da ação dos AH (CANELAS et al., 2002), o que reflete na eficiência da absorção de nutrientes e, por conseguinte, melhora o desenvolvimento em condições de estresse nutricional.

O aumento da MSR se deu pela emissão de pêlos radiculares que foram emitidos pela atuação de moléculas orgânicas promotoras do crescimento vegetal (ZANDONADI et al., 2014) presentes nos AF, que são capazes de percorrer a via apoplástica (devido ao menor tamanho molecular) e serem conduzidos pelos vasos condutores das plantas (ZANIN et al., 2019). Com isso, os grupos funcionais dos AF sinalizaram a ativação de fitormônios que estimulam o desenvolvimento radicular (ZANIN et al., 2019).

Por outro lado, outra hipótese acerca do aumento da MSR é que os AH atuaram por meio da complexação e disponibilização de micronutrientes, *e.g.* Fe^{2+} e Zn^{2+} , na rizosfera (CHEN et al., 2004; ZANIN et al., 2019). Entretanto, Muscolo et al. (2007) teorizam que a atividade biológica das SHs está mais ligada aos grupos funcionais de sua composição do que ao seu tamanho molecular.

As SH atuam no desenvolvimento das raízes e têm certa contribuição no transporte de H^+ na membrana plasmática das células radiculares e na hidrólise do ATP (BALDOTTO; BALDOTTO, 2014). Aumentam a atividade das bombas de H^+ e favorecem a emissão de pêlos

radiculares, pelas raízes laterais finas, o que pode aumentar a área de superfície do sistema radicular e, conseqüentemente, a MSR (OLIVEIRA et al., 2020; ANDRADE et al., 2022).

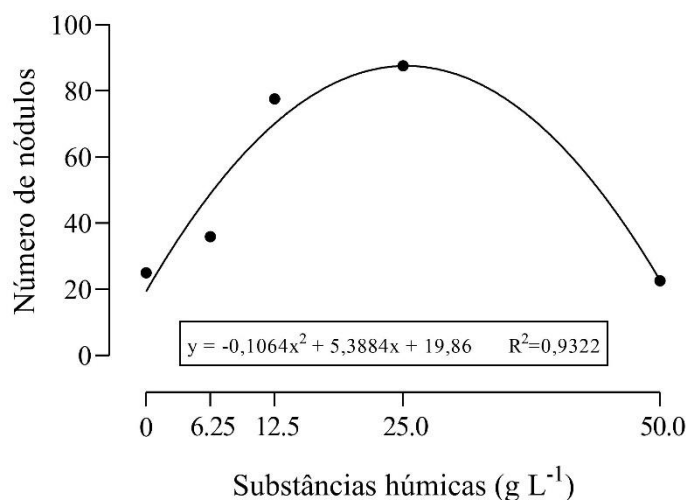
É relatado que as SHs possuem em seu arranjo supraestrutural grupos com atividade auxínica que podem ser liberados devido à exsudação de ácidos orgânicos, como o ácido acético, permitindo evidentemente a ruptura das interações entre os componentes das SHs (CANELLAS; OLIVARES, 2014).

Esta degradação aumenta a mobilidade dos componentes dos AH e AF. Dentre esses componentes mais lábeis estão moléculas bioativas com atividade auxínica, que podem sensibilizar receptores tanto na membrana plasmática quanto no citoplasma, desencadeando respostas típicas à ação desse fitormônio (BORCIONI et al., 2016).

Essa bioatividade é indicada pelo índice de hidrofobicidade, que está relacionado com a estimulação da bomba de prótons (DOBBSS et al., 2010). Sugere-se que o domínio hidrofóbico pode preservar moléculas bioativas como as auxinas na matéria húmica. Em contato com ácidos orgânicos exsudados pelas raízes, as forças hidrofóbicas fracas podem ser rompidas, liberando compostos bioativos dos agregados húmicos (DOBBSS et al., 2010).

Analisando o NN (Figura 5), observou-se que houve efeito quadrático (Tabela 4), onde o melhor resultado (88,08 nódulos) foi obtido com 25,32 g L⁻¹ SHs, correspondendo a um acréscimo de 252,3% quando comparado com o resultado do tratamento testemunha (25 nódulos). Nota-se que doses acima de 25,32 g L⁻¹ de SHs ocasionaram uma redução acentuada do NN, levando a valores semelhantes ao tratamento testemunha.

Figura 4 - Número de nódulos em raízes de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.



A nodulação está fortemente ligada a um sistema radicular desenvolvido. Ao perceber a necessidade de N, o sistema radicular libera compostos flavonoides na solução do solo. As bactérias nativas do solo são estimuladas por esse composto a infeccionar e nodular as raízes. A planta desencadeia a formação de pêlos radiculares que apresentam deformações que permitem a infecção das raízes pelas bactérias nativas do solo.

A nodulação foi potencializada pelo uso de SHs (Tabela 4 e Figura 4), que proporcionaram o aumento da emissão de pêlos radiculares, o que ocasionou o aumento do NN nos tratamentos com SHs (Figura 5).

Outro fator essencial foi a presença de anéis aromáticos na composição dos AF e AH (Figuras 1 e 2). Por ter menor peso molecular, os AF possuem maior facilidade de serem absorvidos pela planta. Ao serem absorvidos, ocorreu a dissolução da estrutura supraestrutural dos AF, liberando os anéis aromáticos no meio intracelular.

Os flavonoides apresentam em sua composição um grupo químico composto por anéis aromáticos ligados a grupos hidroxilas, as flavonas. As flavonas foram utilizadas para síntese de flavonoides, que sinalizaram aos rizóbios a possibilidade de infecção, e consequente nodulação das raízes (SUKUMARAN et al., 2018; LIU; MURRAY, 2016; ZHAO, 2015). Com isso, a emissão acentuada de pêlos radiculares associada com uma forte sinalização da planta para o rizóbio, possibilitaram o aumento do NN com o uso de SHs (Figura 5).

Outro fator que possibilitou o aumento do NN, foi o aporte considerável de carbono no solo, uma vez que a leonardita potássica é rica em compostos com alto teor de carbono (AH,

AF e carbono oxidável) (Tabela 3). Esse carbono aportado ao solo foi utilizado na nutrição dos microrganismos, o que proporcionou maior atividade da microbiota do solo.

Ambos os resultados (Figura 4 e 5) são corroborados por ensaios semelhantes realizados com feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) com a utilização de SHs. Qian et al. (2015), Ibrahim e Ramadan (2015) e Machiani et al. (2019) verificaram que o uso de SHs proporcionou um aumento significativo no CR e área superficial radicular do feijão comum, bem como o aumento do número de nódulos e massa seca de nódulos. Os autores também observaram melhorias significativas da massa seca da parte aérea e da massa seca radicular das plantas, o que corrobora os resultados encontrados na presente pesquisa com feijão-caupi.

Em relação as análises semanais da parte aérea (AP e NF), observou-se que a AP atingiu um platô dos 21 DAS até os 35 DAS. Em seguida, houve desenvolvimento da AP até os 63 DAS, onde ela atingiu um segundo platô até a colheita (Figura 6). Observando o NF, notou-se comportamento semelhante, onde atingiu um platô de desenvolvimento aos 63 DAS até a colheita (Figura 7).

Figura 5 - Desenvolvimento da altura da planta de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.

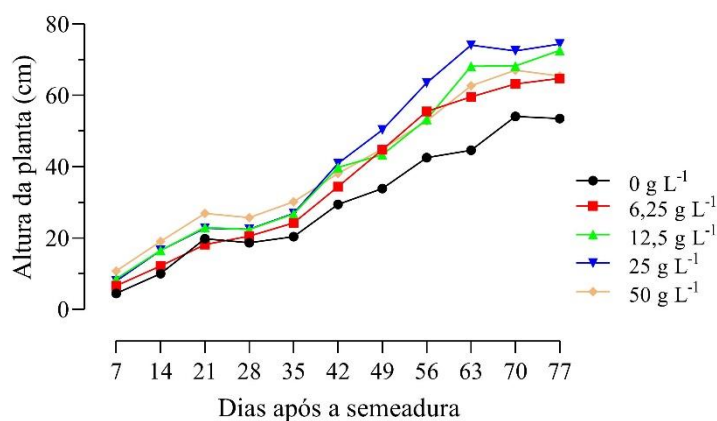
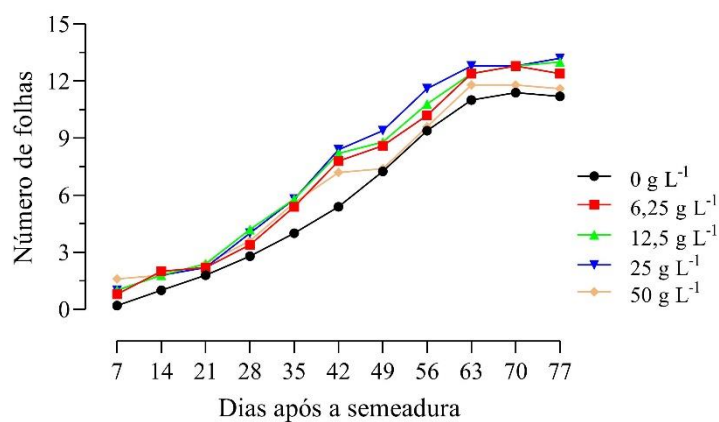


Figura 6 - Desenvolvimento do número de folhas de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.



Por meio da análise semanal (Tabela 5), nota-se que o DC não respondeu ao uso de SHs em nenhum momento durante o ciclo de cultivo do feijão-caupi. Por outro lado, a AP registrou efeito significativo ($p < 0,05$) aos 7, 14, 21, 28 e 35 DAS. Esse comportamento também foi observado para o NF, onde as SHs influenciaram ($p < 0,05$) positivamente esse parâmetro aos 14, 28, 35 e 42 DAS.

Tabela 5 - Valor de p de altura da planta, diâmetro do caule e número de folhas avaliados semanalmente.

DAS	Parâmetros biométricos		
	AP	DC	NF
7	0,0287 *	0,1889 ^{ns}	0,0501 ^{ns}
14	0,0301 *	0,5245 ^{ns}	0,0266 *
21	0,0390 *	0,2044 ^{ns}	0,3221 ^{ns}
28	0,0172 *	0,1409 ^{ns}	0,0059 *
35	0,0094 *	0,7374 ^{ns}	0,0357 *
42	0,0528 ^{ns}	0,3160 ^{ns}	0,0075 *
49	0,2204 ^{ns}	0,0850 ^{ns}	0,1094 ^{ns}
56	0,1649 ^{ns}	0,0748 ^{ns}	0,2009 ^{ns}
63	0,1888 ^{ns}	0,1043 ^{ns}	0,5276 ^{ns}
70	0,6940 ^{ns}	0,2945 ^{ns}	0,5856 ^{ns}
77	0,5328 ^{ns}	0,3421 ^{ns}	0,2557 ^{ns}

DAS = dias após a semeadura. AP = altura da planta. DC = diâmetro do caule. NF = número de folhas. * = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Isso revela que as SHs influenciaram apenas o crescimento inicial da espécie, indicando que esses compostos não afetam os estágios reprodutivos do feijão-caupi. Analisando a AP (Figura 8 e Tabela 6), o melhor resultado aos 7 DAS foi obtido com a dose de 11,7 g L⁻¹ de

SHs, obtendo a AP de 13,9 cm. Aos 14 DAS, a melhor AP (20,1 cm) foi obtida com 7,28 g L⁻¹ de SHs. Aos 21 DAS, a AP atingiu o melhor resultado (19,3 cm) com 0,97 g L⁻¹ de SHs. Aos 28 DAS, a dose 10,68 g L⁻¹ de SHs proporcionou uma AP máxima de 34,3 cm. Enquanto a dose 7,17 g L⁻¹ de SHs propiciou uma AP de 30,9 cm aos 35 DAS.

Figura 7 - Altura da planta de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.

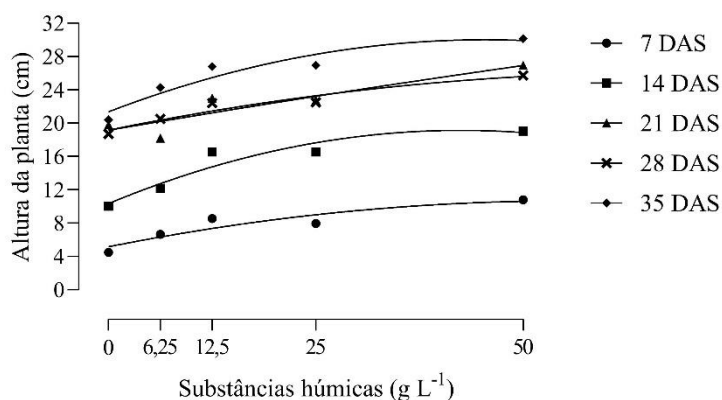


Tabela 6 - Equação e coeficiente de determinação de altura da planta e número de folhas de feijão-caupi cultivado sob a adição de substâncias húmicas.

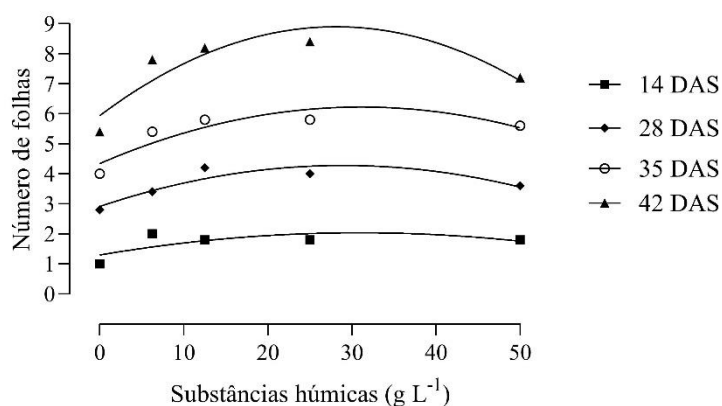
DAS	Parâmetro biométrico			
	Altura da planta (cm)		Número de folhas (por planta)	
	Equação	R ²	Equação	R ²
7	$-0,08x^2 + 1,872x + 2,956$	0,8937	-	-
14	$-0,2614x^2 + 3,8066x + 6,324$	0,9504	$-0,1286x^2 + 0,9114x + 0,36$	0,703
21	$0,4657x^2 - 0,9063x + 19,744$	0,8522	-	-
28	$1,606x + 17,158$	0,9382	$-0,2143x^2 + 1,5057x + 1,44$	0,939
35	$-0,2657x^2 + 3,8143x + 17,2$	0,9522	$-0,2571x^2 + 1,9029x + 2,44$	0,971
42	-	-	$-0,5286x^2 + 3,5914x + 2,44$	0,9718

DAS = dias após a semeadura. R² = coeficiente de determinação.

Já o NF (Figura 9 e Tabela 6), comportou-se de modo semelhante à AP, registrando efeito significativo ($p < 0,05$) ao uso das SHs aos 14, 28, 35 e 42 DAS, o que ressalta a hipótese de que as SHs não influenciam os estágios fenológicos reprodutivos do feijão-caupi (Tabela 5).

Aos 14 DAS, o maior NF (1,9 folhas trifolioladas) foi registrado com 3,5 g L⁻¹ de SHs. Aos 28 DAS, a dose 3,5 g L⁻¹ de SHs registrou o maior NF (4,08 folhas trifolioladas). De modo semelhante, a dose de 3,7 g L⁻¹ de SHs obteve o maior NF (5,9 folhas trifolioladas) aos 35 DAS. Já aos 42 DAS, o maior NF (8,5 folhas trifolioladas) foi obtido com 3,4 g L⁻¹ de SHs.

Figura 8 - Número de folhas de feijão-caupi cultivado sob a adição de ácidos húmicos e fúlvicos.



Com isso, percebeu-se que as SHs, usadas sem o uso de adubação mineral, não fornecem teores de nutrientes para a solução do solo de forma suficiente para contribuir significativamente para melhoria da maioria dos parâmetros biométricos do feijão-caupi a curto prazo. Seu efeito é notado na biologia do solo, com o aumento da população microbiana, pois são fonte de alimento para microrganismos do solo; no sistema radicular das plantas, pois atua por meio de atividade auxínica; e na nodulação de rizóbios em espécies leguminosas.

Assim, por não fornecer nutrientes de forma significativa a curto prazo para a solução do solo, o feijão-caupi registrou baixos índices em seus parâmetros produtivos, pois utilizaram apenas os nutrientes naturalmente disponíveis no solo (Tabela 4).

Contudo, realizar pesquisas sobre o uso de SHs associada com outros compostos no cultivo de espécies comerciais de ciclo anual é importante, uma vez que há estudos que apontam um bom desempenho das bactérias promotoras de crescimento de plantas associada a SHs (SILVA et al., 2021).

Na Tabela 7, observou-se que o CR se correlacionou positiva e moderada com MSR e DC; já a MSPA teve uma correlação fraca e positiva com MN e MSR e forte e positiva com o DC, indicando que altos índices de DC estão proporcionalmente correlacionados com altas MSPA de feijão-caupi. Já a MSR obteve correlação negativa e desprezível com PROD e positiva e moderada com DC. O NN não registrou significância para nenhuma correlação com as demais variáveis.

Tabela 7 - Correlação de Pearson entre as variáveis: comprimento radicular (CR), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca radicular (MSR), número de nódulos (NN), massa seca de

nódulos (MN), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), comprimento da vagem (CDV), produtividade (PROD), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), altura da planta (AP) de feijão-caupi.

	CR	MSPA	MSR	NN	MN	NVP	NGV	CDV	PROD	DC	NF	AP
CR	1											
MSPA	0,34	1										
MSR	0,64 **	0,47 **	1									
NN	0,1	0,1	-0,08	1								
MN	0,12	0,49 **	0,13	0,3	1							
NVP	-0,24	0,15	-0,04	-0,07	0,02	1						
NGV	0,15	-0,26	-0,25	-0,1	-0,17	-0,51 **	1					
CDV	0,26	-0,09	-0,04	-0,17	-0,15	-0,58 **	0,78 **	1				
PROD	-0,23	-0,06	-0,4 **	-0,04	0,01	0,48 **	0,11	-0,02	1			
DC	0,58 **	0,78 **	0,63 **	0,23	0,27	0,1	-0,24	-0,13	-0,16	1		
NF	0,18	0,11	0,14	0,3	0,01	-2,80E-03	0,05	0,2	-0,11	0,2	1	
AP	0,22	0,33	0,29	-0,1	0,03	0,12	-0,11	0,15	-0,01	0,42 **	0,73 **	1

** : significativo a 5% de probabilidade.

O NVP obteve correlação negativa e moderada com NGV e CDV, enquanto com a PROD, obteve correlação positiva e fraca. Além do NVP, o NGV também obteve correlação com CDV, forte e positiva, indicando que plantas de feijão-caupi com vagens compridas, proporcionalmente estarão associadas com altos índices de NGV. Enquanto isso, o DC também registrou correlação com AP, positiva e fraca.

Por fim, além da correlação com DC, a AP registrou correlação positiva e forte com o NF, mostrando que plantas de feijão-caupi com muitas folhas estão proporcionalmente associadas com plantas de feijão-caupi mais altas.

Na Tabela 8, observou-se a estrutura geral de variância e covariância da análise de componentes principais (ACP). O primeiro componente principal (CP 1) explicou 26,54% da variação total entre os parâmetros biométricos e produtivos do feijão-caupi, após aplicações de 0, 6,25, 12,5, 25 e 50 g L⁻¹ de SHs. O segundo componente principal (PC 2) explicou 21,73% desta variação. Como consequência, a ACP explicou 47,27% da estrutura geral de variância e covariância, ou seja, baixa explicação das variações dos dados, onde não foi possível atingir o mínimo exigido para ser considerado razoável.

Tabela 8 – Coeficientes e variação total explanada de cada componente principal.

Variáveis	Componente Principal*	
	PC1	PC2
Comprimento radicular	-0,79	0,45

Massa seca da parte aérea	-0,78	-0,13
Massa seca radicular	-0,92	0,06
Número de nódulos	-0,25	-0,13
Massa seca de nódulos	-0,46	-0,28
Número de vagens por planta	0,00	-0,93
Número de grãos por vagem	0,31	0,97
Comprimento da vagem	0,05	1,06
Produtividade	0,43	-0,32
Diâmetro do caule	-1,04	-0,14
Número de folhas	-0,52	0,26
Altura da planta	-0,67	0,11
Eigenvalue	3,18	2,48
Variação (%)	26,34	21,02
Variação acumulada (%)	26,34	47,36

* Escores com alto peso na construção do CP>0

Foi observado menor ponderação de PROD do feijão-caupi no processo de extração CP 1, bem como maior ponderação de CDV e NGV para extrações de CP 2, sugerindo uma variação relacionada à CR, NF, AP, DC, MSR, MSPA, NN e MN (CP 1) e NVP de feijão-caupi (CP 2).

A análise conjunta de CP 1 e CP 2 por meio do biplot permitiu uma organização bidimensional das características multivariadas dos tratamentos avaliados conforme os parâmetros mensurados, dividindo-os claramente em quatro grupos (Figura 10).

O tratamento correspondente à dose 25 g L⁻¹ de SHs foi deslocado para o quadrante II pelo eixo dos componentes principais no sentido positivo no biplot (Figura 11). Portanto, esse tratamento apresentou tendência a valores médios elevados para as variáveis AP, MSR, CR e NF de feijão-caupi. Por outro lado, a utilização de 6,25 e 12,5 g L⁻¹ de SHs tende a suprimir esses parâmetros.

Figura 9 - Análise de componentes principais dos parâmetros biométricos e produtivos do feijão-caupi cultivado sob aplicação de substâncias húmicas.

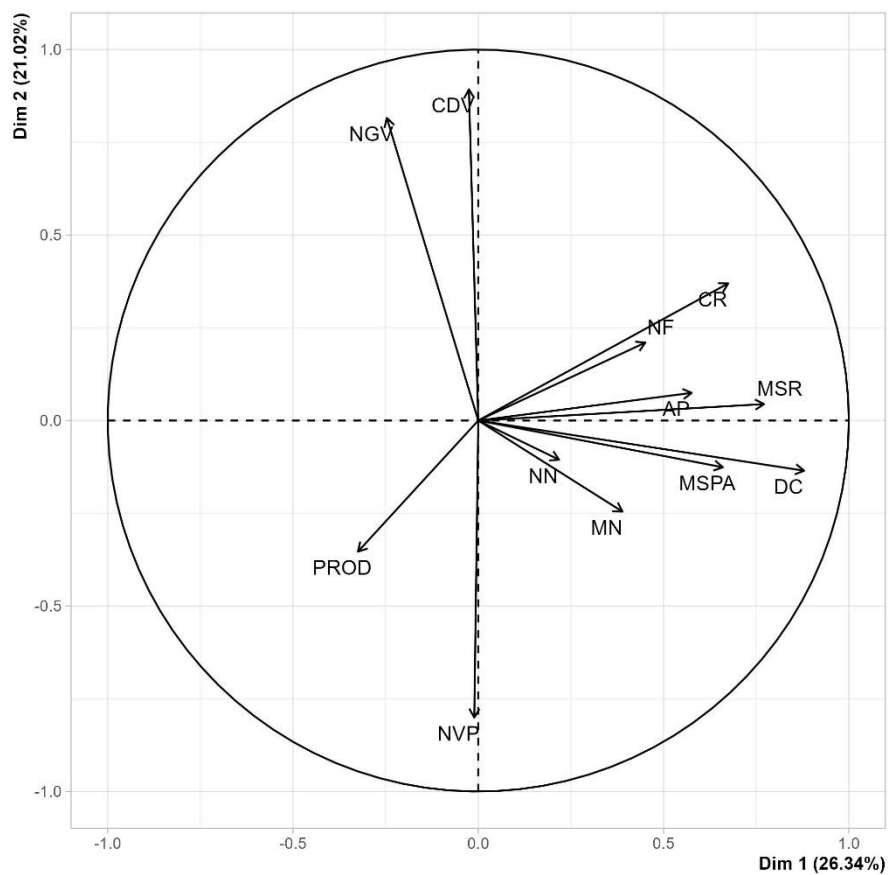
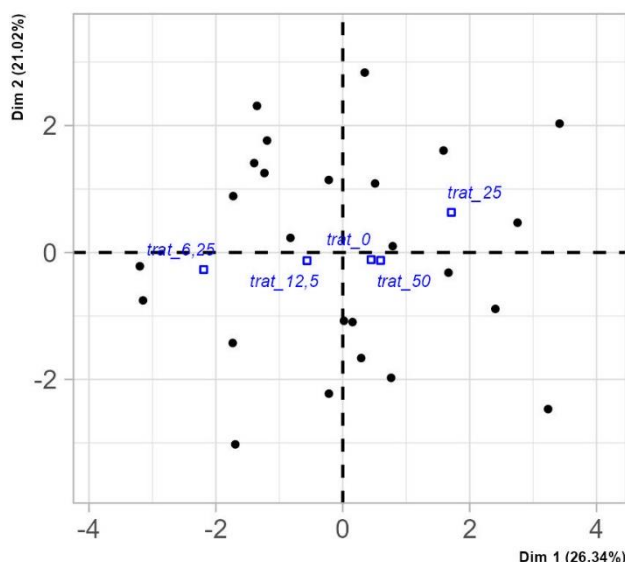


Figura 10 - Análise de componentes principais dos indivíduos de feijão-caupi cultivado sob diferentes doses de substâncias húmicas.



Os tratamentos 0 e 50 g L⁻¹ de SHs foram deslocados para o quadrante III pelo eixo dos componentes principais no sentido negativo no biplot, apresentando características multivariadas semelhantes, com tendência a valores médios elevados para as variáveis MSPA, DC, NN e MN de feijão-caupi (Figuras 10 e 11). Por outro lado, a utilização de 6,25 e 12,5 g L⁻¹ de SHs tende a suprimir esses parâmetros.

Enquanto isso, os tratamentos 6,25 e 12,5 g L⁻¹ de SHs foram deslocados para o quadrante IV pelo eixo dos componentes principais no sentido negativo no biplot, apresentando características semelhantes, com tendência a valores médios elevados para os parâmetros PROD e NVP (Figuras 10 e 11). Entretanto, a utilização de 25 g L⁻¹ de SHs induz a redução de valores médios desses parâmetros.

Contudo, para entender mais ainda a influência das SHs na presente pesquisa, torna-se importante o estudo das características estruturais e químicas do SH na solução do solo, o que permitirá a transferência do conhecimento obtido em sistemas controlados para condições reais de campo. Isto ajudaria a esclarecer a contribuição direta das SHs para a nutrição e o crescimento do feijão-caupi e sua utilidade no campo.

5. CONCLUSÕES

As substâncias húmicas promovem o desenvolvimento do sistema radicular do feijão-caupi, por meio do aumento da massa seca radicular, ocasionada pela emissão de pêlos radiculares. O mesmo acontece com a nodulação, onde foi observado que a nodulação do feijão-caupi por bactérias nativas do solo é otimizada com o uso de substâncias húmicas, uma vez que elas atuam indiretamente na sinalização para que tal simbiose aconteça.

Entretanto, com base nos resultados, nota-se que as substâncias húmicas influenciam apenas o crescimento inicial do feijão-caupi (Até os 42 dias após a semeadura), não interferindo em nenhuma fase do estágio reprodutivo do feijão-caupi.

O uso de substâncias húmicas, não associada com adubação mineral, não afeta os parâmetros produtivos do feijão-caupi, tendo em vista que esses compostos não fornecem os minerais necessários a curto prazo para que os parâmetros produtivos possam responder positivamente. Recomenda-se o uso de 32,66 g L⁻¹ de substâncias húmicas (leonardita potássica) para aumento da massa seca radicular e para maior número de nódulos em raízes de feijão-caupi.

É necessário mais estudo sobre os efeitos diretos e indiretos desses compostos (ácidos húmicos e fúlvicos) em culturas comerciais, como o feijão-caupi, tanto individualmente quanto associadas com outros compostos (*e.g.*, adubação mineral), a fim de otimizar o seu cultivo por meio de compostos orgânicos naturais com baixo impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ-PUEBLA, R.A.; VALENZUELA-CALAHORRO, C.; GARRIDO, J.J. Theoretical study on fulvic acid structure, conformation and aggregation. A molecular modelling approach. **Science of The Total Environment**, v. 358, n. 1-3, p. 243–254, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969705002536> Acesso em: 22 ago. 2023.

ANDRADE, H.A.F.; MACHADO, N. A. F.; OLIVEIRA, A. R. F.; SILVA, T. F.; SANTOS, L.R dos; GARRETO, V. C.; SILVA-MATOS, R. R. S. da. Effect of substrate of carnauba residue with humic substances on seedling production of papaya cultivar 'Golden'. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 53, n. 7, p. 902-912, 2022. Disponível em: <https://www-tandfonline.ez17.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/00103624.2022.2034846> Acesso em: 11 fev. 2024.

ASHRAF, M.N.; HU, C.; XU, X.; AZIZ, T.; WU, L.; WAQAS, M.A.; FAROOQ, M.; HU, X.; ZHANG, W.; XU, M. Long-term manure application increased soil organic carbon and nitrogen mineralization through accumulation of unprotected and physically protected carbon fractions. **Pedosphere**, v. 33, n. 2, p. 343-354, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016022000534?casa_token=snRgaNATgSAAAAAA:cy0W_QA8iZ-K8e8VVwiCCQ2k30IPVKkkw9h7AhwAp2Xl5Y9tFmJgabXenPBsYN1Wpy8p-AtImtk Acesso em: 30 jan. 2024.

AZEVEDO, S. A. de; MORAIS, J.; SOBRINHO, N. de A.; DIAS, V. L. N.; OLIVEIRA, J. D. de; NASCIMENTO, I. de O. Avaliação da qualidade nutricional da alface cultivada em solo sob aplicação de ácidos húmicos e fúlvicos associados à adubação mineral. **Acta Tecnológica**, v. 15, n. 1, p. 81-96, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350207032_Avaliacao_da_qualidade_nutricional_d_a_alface_cultivada_em_solo_sob_aplicacao_de_acidos_humicos_e_fulvicos_associados_a_adubacao_mineral Acesso em: 27 set. 2023.

BALDOTTO, L. E.; BALDOTTO, M. A. Adventitious rooting on the Brazilian red-cloak and sanchezia after application of indolebutyric and humic acids. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 4, p. 434–439, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/fz7q9sJrYbQgg7HVw8hkhzs/> Acesso em: 20 ago. 2023.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. **Revista Ceres**, v. 61, p. 856-881, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/94wksVHhCDcDxkVdYqb4Pqw/#> Acesso em: 26 dez. 2023.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. de S.; ALVAREZ, V. H.; CORRÊA, M. M. Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 11-20, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/whBDWD6ttc9tNcmkMmKrZmh/> Acesso em: 09 ago. 2023.

BEZERRA, A. A. C.; NEVES, A. C.; ALCÂNTARA NETO, F.; SILVA JÚNIOR, J. V. Morfofisiologia e produção de feijão-caupi, cultivar BRS ‘novaera’, em função da densidade de plantas. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 4, p. 135-141, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/3287> Acesso em: 12 fev. 2024

BLAGODATSKAYA, E.V.; BLAGODATSKYA, S.A.; ANDERSON, T.H.; KUZYAKOV, Y. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies. **Applied Soil Ecology**, v. 37, n. 1-2, p. 95-105, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139307000704> Acesso em: 09 jan. 2024.

BONANOMI, G.; FILIPPIS, F.; ZOTTI, M.; IDBELLA, M.; CESARANO, G.; AL-ROWAILY, S.; ABD-ELGAWAD, A. Repeated applications of organic amendments promote beneficial microbiota, improve soil fertility and increase crop yield. **Applied Soil Ecology**, v. 156, p. 103714, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139320306430> Acesso em: 30 jan. 2024.

BOOSTANI, H. R.; HARDIE, A. G.; NAJAFI-GHIRI, M.; MIRSOLEIMANI, A.; AMIN, H. Comparative study of individual and combined application of humic acid, wood vinegar, and biochar on soil Zn chemical fractions and its uptake by sour orange (*Citrus aurantium* L.) Seedlings. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 20, p. 1-11, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103624.2023.2262510> Acesso em: 22 out. 2023.

BORCIONI, E.; MÓGOR, A. F.; PINTO, F. Aplicação de ácido fúlvico em mudas influenciando o crescimento radicular e produtividade de alface americana. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 509-515, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/sFwwtctbVpkm7tdMc67LBPR/#> Acesso em: 18 dez. 2023.

BOUKAR, O.; BELKO, N.; CHAMARTHI, S.; TOGOLA, A.; BATIENO, J.; OWUSU, E.; OJIEWO, C. Cowpea (*Vigna unguiculata*): Genetics, genomics and breeding. **Plant Breeding**, v. 138, n. 4, p. 415-424, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pbr.12589> Acesso em: 12 fev. 2024.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J.W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant Soil**, v. 383, n. 1-2, p. 3-41, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262223222_Agricultural_uses_of_plant_biostimulants Acesso em: 15 out. 2023.

CAMARA, F.T.; MOTA, A.M.D.; NICOLAU, F.E.A.; PINTO, A.A.; SILVA, J.M.F. Produtividade de feijão-caupi crioulo em função do espaçamento entre linhas e número de plantas por cova. **Journal of Neotropical Agriculture**, v.5, n.2, p.19-24, 2018. Disponível em: <https://scite.ai/reports/produtividade-de-feijao-caupi-crioulo-ejlGMv0#:~:text=De%20acordo%20com%20Camara%20et%20al%20%282018%29%2C%20ao,o%20melhor%20aproveitamento%20de%20luz%2C%20%C3%A1gua%20e%20nutrientes.%E2%80%A6%E2%80%9D> Acesso em: 12 fev. 2024.

CAMPITELLI, P., CEPPI, S. Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids. **Geoderma**, v. 144, n. 1-2, p. 325–333, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706107003424> Acesso em: 07 out. 2023.

CAMPOS, M. L. de; LACERDA, M. L.; ASPIAZÚ, I; CARVALHO, A. J. de; SILVA, R. F. CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 1, p. 1-11, 2014. Disponível em: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/2196-5641-1-3> Acesso em: 25 nov. 2023

CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; AGUIAR, N. O.; JONES, D. L.; NEBBIOSO, A.; MAZZEI, P.; PICCOLO, A. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 15–27, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423815301771> Acesso em: 10 out. 2023.

CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; OKOROKOVA-FAÇANHA, A. L.; FAÇANHA, A. R. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. **Plant Physiology**, v. 130, n. 4, p. 1951-1957, 2002. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/130/4/1951/6110575> Acesso em: 13 dez. 2023.

CARVALHO, M.; LINO NETO, T.; ROSA, E. A. dos S.; CARNIDE, V. Cowpea: a legume crop for a challenging environment. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 13, p. 4273-4284, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28182297/> Acesso em: 12 fev.2024.

CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5a Aproximação. Antonio Carlos Ribeiro, Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Vitor Hugo Alvarez V. (Eds.) Viçosa, MG: 1999. 359p

CHEN, R.; SENBAYRAM, M.; BLAGODATSKY, S.; MYACHINA, O.; DITTERT, K.; LIN, X.; BLAGODATSKAYA, E.; KUZUYAKOV, Y. Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories. **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2356-2367, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12475> Acesso em 09 jan. 2024.

CHEN, Y.; CLAPP, C.E.; MAGEN, H. Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: The role of organo-iron complexes. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 50, p. 1089-1095, 2004. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00380768.2004.10408579> Acesso em: 19 dez. 2023.

CIHLÁŘ, Z.; VOJTOVÁ, L.; CONTE, P.; NASIR, S.; KUČERÍK, J. Hydration and water holding properties of cross-linked lignite humic acids. **Geoderma**, v. 230–231, p. 151–160, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001670611400175X> Acesso em: 01 nov. 2023.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. 2023. **Produção e balanço de oferta e demanda de grãos, safra 2022/2023**. Décimo segundo levantamento, setembro de 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos> Acesso em: 12 fev. 2024.

COSTA, C. A. A.; SILVA-MATOS, R. R. S. da; AZEVEDO, G. A. de; MORAES, T. C. de; PEREIRA, R. Y. F.; SOUSA JÚNIOR, A. D. O. de; OLIVEIRA, M. M. T. de. Humic substance and substrate based on babassu decomposed stem in the production of sunflower seedlings. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e456986098, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/6098> Acesso em: 10 jan. 2024.

CUNHA, M. D. S.; CAVALCANTE, Í. H. L.; MANCIN, A. C.; ALBANO, F. G.; MARQUES, A. S. Impact of humic substances and nitrogen fertilising on the fruit quality and yield of custard apple. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 37, n. 2, p. 211-218, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/hXwhktx7cRSc59rYL9thGWv/> Acesso em: 15 set. 2023.

DIALLO, M. S.; SIMPSON, A.; GASSMAN, P.; FAULON, J.L.; JOHNSON JR., J.H.; GODDARD III, W.A.; HATCHER, P.G. 3-D structural modeling of humic acids through experimental characterization, computer assisted structure elucidation and atomistic simulations. 1. Chelsea soil humic acid. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 9, p. 1783–1793, 2003. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12775049/> Acesso em: 31 out. 2023.

DIAS, D. do N.; LIMA, A. M. N.; CUNHA, J. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; SOARES, E. M. B.; SILVA, K. A. da; RODRIGUES, M. S.; SILVA, T. S. da. Fertigation with nitrogen and humic substances on soil chemical attributes cultivated with west Indian cherry. **Comunicata Scientiae**, v. 14, n. 1, p. e3990, 2023. Disponível em: <https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/3990> Acesso em: 11 nov. 2023.

DOBBSS, L.B.; CANELLAS, L.P.; OLIVARES, F.L.; AGUIAR, N.O.; PERES, L.E.P.; AZEVEDO, M.; SPACCINI, R.; FACANHA, A. R. Bioactivity of chemically transformed humic matter from vermicompost on plant root growth. **J. Agric. Food Chem.**, v. 58, n. 6, p. 3681-3688, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20232906/> Acesso em: 20 dez. 2024.

DOU, S.; SHAN, J.; SONG, X.; CAO, R.; WU, M.; LI, C.; GUAN, S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness. **Pedosphere**, v. 30, n. 2, p. 159-167, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez17.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1002016020600017?via%3Dihub> Acesso em: 11 fev. 2024.

DUTRA, A. F.; MELO, A. S. de; FILGUEIRAS, L. M. B.; SILVA, Á. R. F. da; OLIVEIRA, I. M. de; BRITO, M. E. B. Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista brasileira de ciências agrárias**, v. 10, n. 2, p. 189-197, 2015. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v10i2a3912> Acesso em: 12 fev. 2024.

FAN, P.; XU, P.; ZHU, Y.; TU, X.; SONG, G.; ZUO, Y.; BI, Y. Addition of humic acid accelerates the growth of *Euglena pisciformis* AEW501 and the accumulation of lipids. **Journal of Applied Phycology**, v. 34, p. 51-63, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-021-02623-9> Acesso em: 26 jan. 2024.

FONTAINE, S.; MARIOTTI, A.; ABBADIE, L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 6, p. 837-843, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071703001238> Acesso em: 09 jan. 2024.

FONTANA, A.; BRITO, R. J. de; PEREIRA, M. G.; LOSS, A. Índices de agregação e a relação com as substâncias húmicas em Latossolos e Argissolos de tabuleiros costeiros, Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 3, p. 291-297, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119016971002.pdf> Acesso em: 5 out. 2023.

GARCÍA, A. C.; VAN TOL DE CASTRO, T. A.; SANTOS, L. A.; TAVARES, O. C. H.; CASTRO, R. N.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA-MINA, J. M. Structure-property-function relationship of humic substances in modulating the root growth of plants: A review. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p. 1622–1632, 2019. disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/jeq2019.01.0027> Acesso em: 12 fev. 2024.

GERKE, J. 2022. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon Storage. **Soil Systems**, v. 6, n. 2, p. 33, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8789/6/2/33> Acesso em: 30 jan. 2024.

GERKE, J. The effect of humic substances on phosphate and iron acquisition by higher plants: Qualitative and quantitative aspects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 184, p. 329-338, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.202000525> Acesso em: 30 jan. 2024.

GUO, X., HUANG, J., LU, Y., SHAN, G., LI, Q. The influence of flue gas desulphurization gypsum additive on characteristics and evolution of humic substance during co-composting of dairy manure and sugarcane pressmud. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 169–174, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852416311051> Acesso em: 27 out. 2023.

GUO, X.; LIU, H.; WU, S. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. **Science of The Total Environment**, v. 662, p. 501-510, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719301548> Acesso em: 02 set. 2023.

HAMMERSCHMIEDT, T.; HOLATKO, J.; PECINA, V.; HUSKA, D.; LATAL, O.; KINTL, A.; RADZIEMSKA, M.; MUHAMMAD, S.; GUSIATIN, Z. M.; KOLACKOVA, M.; NASIR, M.; BALTAZAR, T.; AHMED, N.; BRTNICKY, M. Assessing the potential of biochar aged by humic substances to enhance plant growth and soil biological activity. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 8, n. 46, p. 1-12, 2021. Disponível em:

<https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-021-00242-7> Acesso em: 26 jan. 2024.

HASANUZZAMAN, M.; NOWROZ, F.; RAIHAN, MD. R. H.; SIDDIKA, A.; ALAM, MD. M.; PRASAD, P. V. V. Application of biochar and humic acid improves the physiological and biochemical processes of rice (*Oryza sativa* L.) in conferring plant tolerance to arsenic-induced oxidative stress. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 31, n.1, p. 1562–1575, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-31119-x> Acesso em: 26 jan. 2024.

HOLANDA, R. M.; MEDEIROS, R. M. de. Classificação climática pelo método de Köppen e Thornthwaite em Bom Jesus do Piauí, Brasil. **Revista Pantaneira**, v. 16, p. 57-68, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/revpan/article/view/9075> Acesso em 13 fev. 2024.

IBRAHIM, E.A.; RAMADAN, W. A. Effect of zinc foliar spray alone and combined with humic acid or/and chitosan on growth, nutrient elements content and yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants sown at different dates. **Scientia Horticulturae**, v. 184, p. 101-105, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030442381400630X> Acesso em: 02 jan. 2024.

JAYATHILAKEA, C.; VISVANATHANA, R.; DEENA, A.; BANGAMUWAGEA, R.; JAYAWARDANAB, B. C.; NAMMIC, S.; LIYANAGEA, R. Cowpea: An overview on its nutritional facts and health benefits. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, p. 4793–4806, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29656381/> Acesso em: 12 fev. 2024.

JIANG, H.; HAN, X.; ZOU, W.; HAO, X.; ZHANG, B. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 268, p. 133–143, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880918303888> Acesso em: 30 jan. 2024.

JINDO, K.; SONOKI, T.; MATSUMOTO, K.; CANELLAS, L.; ROIG, A.; SANCHEZ-MONEDERO, M.A. Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures. **Waste Management**, v. 49, p. 545–552, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16300071> Acesso em: 12 out. 2023.

KUČERÍK, J.; BURSÁKOVÁ, P.; PRŮŠOVÁ, A.; GREBÍKOVÁ, L.; SCHAUMANN, G.E. Hydration of humic and fulvic acids studied by DSC. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 110, p. 451–459, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-011-2178-1> Acesso em: 04 nov. 2023.

LEE, J. G.; YOON, H. Y.; CHA, J. Y.; KIM, W. Y.; KIM, P. J.; JEON, J. R. Artificial humification of lignin architecture: top-down and bottom-up approaches. **Biotechnology Advances**, v. 37, n. 8, p. 107416, 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975019301168> Acesso em: 10 nov. 2023.

LEHMANN, J; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature16069> Acesso em: 30 jan. 2024.

LIU, C.W.; MURRAY, J.D. The role of flavonoids in nodulation host-range specificity: an update. **Plants**, v. 5, n. 3, p. 1-13, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/5/3/33> Acesso em 06 fev. 2024.

LIU, X. J. A.; FINLEY, B. K.; MAU, R. L.; SCHWARTZ, E.; DIJKSTRA, P.; BOWKER, M. A.; HUNGATE, B. A. The soil priming effect: Consistent across ecosystems, elusive mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 140, p. 107617, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071719302810> Acesso em: 31 out. 2023.

LIU, Z.; ZU, Y.; MENG, R.; XING, Z.; TAN, S.; ZHAO, L.; SUN, T.; ZHOU, Z. Adsorption of humic acid onto carbonaceous surfaces: atomic force microscopy study. **Microscopy and Microanalysis**, v. 17, p. 1015–1021, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22047766/> Acesso em: 02 nov. 2023.

LODYGIN, E.; ABAKUMOV, E. The impact of agricultural use of retisols on the molecular structure of humic substances. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 144-153, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/1/144> Acesso em: 12 fev. 2024

MACHIANI, M. A.; REZAEI-CHIYANEH, E.; JAVANMARD, A.; MAGGI, F.; MORSHEDLOO, M. R. Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed yield and quali-quantitative production of the essential oils from fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) and dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in intercropping system under humic acid application. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 112-122, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619322061> Acesso em 02 jan. 2024.

MAJI, D.; MISRA, P.; SINGH, S.; KALRA, A. Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisum sativum*. **Applied Soil Ecology**, v. 110, p. 97–108, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139316304863> Acesso em: 18 nov. 2023.

MEHTA, C.M.; PALNI, U.; FRANKE-WHITTLE, I.H.; SHARMA, A.K. Compost: its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. **Waste Management**, v. 34, n. 3, p. 607–622, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X13005655> Acesso em: 25 out. 2023.

MELO, B. A.; MOTTA, F. L.; SANTANA, M. H. Humic acids: structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. **Materials Science and Engineering: C**, v. 62, p. 967–974, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493115306123> Acesso em: 11 out. 2023.

MIRANDA, G. A. P; ARARUNA JÚNIOR, J. T.; BROCCCHI, E. de A., WANG, H. Humic substances reduce the erodibility of soils in mining areas. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123700, 2021. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez17.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652620337458?via%3Dihub> Acesso em: 11 fev. 2024.

MOSAAD, I. S. M.; SERAG, A. H. I.; SHETA, M. H. Promote sugar beet cultivation in saline soil by applying humic substances in-soil and mineral nitrogen fertilization. **Journal of plant nutrition**, v. 45, n. 16, p. 2447–2464, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2022.2046063> Acesso em: 21 nov. 2023.

MUSCOLO, A.; FRANCIOSO, O.; TUGNOLI, V.; NARDI, S. The auxin-like activity of humic substances is related to membrane interactions in carrot cell cultures. **Journal of Chemical Ecology**, v. 33, p. 115-129, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10886-006-9206-9> Acesso em: 20 dez. 2023.

NARDI, S.; ERTANI, A.; FRANCIOSO, O. Soil–root cross-talking: The role of humic substances. **Journal of plant nutrition and soil science**, v. 180, n. 1, p.5-13, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jpln.201600348> Acesso em: 23 out. 2023.

NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; GESSA, C.; FERRARESE, L.; TRAINOTTI, L.; CASADORO, G. A low molecular weight humic fraction on nitrate uptake and protein synthesis in maize seedlings. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 32, p. 415–419, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071799001686?via%3Dihub> Acesso em: 12 nov. 2023.

NARDI, S.; SCHIAVON, M.; FRANCIOSO, O. Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. 26, n. 8, p. 2256, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/8/2256> Acesso em: 30 jan. 2024.

OLIVEIRA, A. M. C. de; JEAN, A.; DAMASCENO-SILVA, K. J.; MOREIRA-ARAÚJO, R. S. dos R.; FRANCO, L. J. D.; ROCHA, M. de M. Proximate composition, minerals, tannins, phytates and cooking quality of commercial cowpea cultivars. **Caatinga**, v. 36, n. 3, p. 702-710, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/11429> Acesso em: 07 fev. 2024.

OLIVEIRA, P. S. T. de; SILVA, F. L. de S.; CORDEIRO, K. V.; SOUSA, G. dos S.; NUNES, R. L. S.; PEREIRA, R. Y. F.; ALBANO-MACHADO, F. G.; OLIVEIRA, M. M. T. de; SILVA-MATOS, R. R. S. da. Efficacy of substrate and humic substance on cuttings production of *Spondia purpurea* L. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e60985006, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5006> Acesso em: 10 jan. 2024.

OLK, D. C.; BLOOM, P. R.; PERDUE, E. M.; MCKNIGHT, D. M.; CHEN, Y.; FARENHORST, A.; SENESI, N.; CHIN, Y. P.; SCHMITT-KOPPLIN, P.; HERTKORN, N.; HARIR, M. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters. **J Environ Qual.**, v. 48, p. 217–232, 2019.

Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura do feijão-caupi. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 1, p. 1-8, 2023. Disponível em: <https://portaleventos.uffs.edu.br/index.php/JORNADA/article/view/5495#:~:text=A%20interfer%C3%Aancia%20de%20plantas%20daninhas%20em%20culturas%20pode,manejo%20das%20plantas%20daninhas%20%28Agostinetto%20et%20al.%2C%202008%29>. Acesso em: 12 fev. 2024.

PERVEEN, N.; BAROT, S.; MAIRE, V.; COTRUFO, M.F.; SHAHZAD, T.; BLAGODATSKAYA, E.; STEWART, C.E.; DING, W.; SIDDIQ, M.R.; DIMASSI, B.; MARY B.; FONTAINE, S. Universality of priming effect: an analysis using thirty-five soils with contrasted properties sampled from five continents. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 134, p. 162-171, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071719301026> Acesso em: 25 set. 2023.

PETRIC, I.; HELIĆ, A.; AVDIĆ, E.A. Evolution of process parameters and determination of kinetics for co-composting of organic fraction of municipal solid waste with poultry manure. **Bioresource Technology**, v. 117, p. 107–116, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412006517> Acesso em: 18 set. 2023.

POPA, D. G.; LUPU, C.; CONSTANTINESCU-ARUXANDEI, D.; OANCEA, F. Humic substances as microalgal biostimulants-implications for microalgal biotechnology. **Marine drugs**, v. 20, n. 5, p. 327-353, 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9143693/> Acesso em: 26 jan. 2024.

POPE, F.D.; HARPER, L.; DENNIS-SMITHER, B.J.; GRIFFITHS, P.T.; CLEGG, S.L.; COX, R.A. Laboratory and modelling study of the hygroscopic properties of two model humic acid aerosol particles. **Journal of Aerosol Science**, v. 41, n. 5, p. 457–467, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850210000455> Acesso em: 30 set. 2023.

QIAN, S.; DING, W.; LI, Y.; LIU, G.; SUN, J.; DING, Q. Characterization of humic acids derived from Leonardite using a solid-state NMR spectroscopy and effects of humic acids on growth and nutrient uptake of snap bean. **Chemical Speciation & Bioavailability**, v. 27, n. 4, p. 156-161, 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09542299.2015.1118361> Acesso em: 02 jan. 2024.

RAGURAJ, S.; KASIM, S.; JAAFAR, N.M.; NAZLI, M. H.; AMALI, R. K. A. A comparative study of tea waste derived humic-like substances with lignite-derived humic substances on chemical composition, spectroscopic properties and biological activity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 60631–60640, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-20060-0> Acesso em: 16 out. 2023.

RASHAD, M.; HAFEZ, M.; POPOV, A. I. Humic substances composition and properties as an environmentally sustainable system: A review and wayforward to soil conservation. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 7, p. 1072–1122, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2021.2005801> Acesso em: 20 out. 2023.

RITTER, G.; VILLA, F.; SILVA, D. F. da; EBERLING, T.; GUIMARÃES, V. F.; SILVA, E. C. da; DÓRIA, J. Humic substances and modes of application in the rooting of semi-hardwood cuttings of two olive cultivars. **Comunicata Scientiae**, v. 14, p. e3700, 2023. Disponível em: <https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/3700> Acesso em: 10 nov. 2023.

ROSE, M. T.; PATTI, A. F.; LITTLE, K. R.; BROWN, A. L.; JACKSON, W. R.; CAVAGNARO, T. R. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 124, p. 37–89, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128001387000024> Acesso em: 29 out. 2023.

SÁ, M. C.; CAMPOS, A. R. M.; EVARISTO, A. B.; SILVA, R. S.; DOBBS, L. B. Quality and bioactivity of humic substances from soils grown with cover crops. **Eurasian Soil Science**, v. 56, n. 10, p. 1420–1431, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229323600240> Acesso em: 25 jan. 2024.

SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; OLIVEIRA, I. A.; PEREIRA, C. E.; CAMPOS, M. C. C. Crescimento de cultivares de feijão-caupi em solo de terra firme e várzea. **Ambiência**, v. 13, n. 1, p. 261–270, 2017. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/2376/0> Acesso em: 12 fev. 2024.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SHARMA, A.; WEINDORF, D.C.; WANG, D.D.; CHAKRABORTY, S. Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 4. Cation exchange capacity (CEC). **Geoderma**, v. 239–240, p. 130–134, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706114003681> Acesso em: 07 nov. 2023.

SILVA, G. F. da; HELLWIG, C. G.; BARRETO, C. F.; MARTINS, C. R.; MELLO-FARIA, P. C. Growth of pecan rootstocks with the use of liquid humus in an organic production system. **Comunicata Scientiae**, v. 14, p. e3957, 2023. Disponível em: <https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/3957> Acesso em: 08 nov. 2023.

SILVA, M. S. R. A.; CARVALHO, L. A. L. DE; BRAOS, L. B.; ANTUNES, L. F. S. DE; SILVA, C. S. R. A. DE; SILVA, C. G. N. DE; PINHEIRO, D. G.; CORREIA, M. E. F.; ARAÚJO, E. S.; COLNAGO, L. A.; DESOIGNIES, N.; ZONTA, E.; RIGOBELLO, E. C. Effect of the application of vermicompost and millicompost humic acids about the soybean microbiome under water restriction conditions. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 1000222,

2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2022.1000222/full> Acesso em 25 jan. 2024.

SILVA, M. S. R. A.; SANTOS, B. D. M. S.; SILVA, C. S. R. A. DA; SILVA, C. S. R. A. DA; ANTUNES, L. F. S.; SANTOS, R. M. DOS; SANTOS, C. H. B.; RIGOBELLO, E. C. Humic substances in combination with plant growth-promoting bacteria as an alternative for sustainable agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 719653, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.719653/full> Acesso em: 26 jan. 2023.

SILVA, M.E.F.; DE LEMOS, L.T.; NUNES, O.C.; CUNHA-QUEDA, A.C. Influence of the composition of the initial mixtures on the chemical composition, physicochemical properties and humic-like substances content of composts. **Waste Management**, v. 34, n. 1, p. 21–27, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X1300442X> Acesso em: 05 nov. 2023.

SOFO, A.; ZANELLA, A.; PONGE, J. Soil quality and fertility in sustainable agriculture, with a contribution to the biological classification of agricultural soils. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 2, p. 1085-1112, 2022. Disponível em: <https://bsssjournals-onlinelibrary-wiley.ez17.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1111/sum.12702> Acesso em: 30 jan. 2024.

SOUSA, G. G.; VIANA, T. V. DE A.; LACERDA, C. F. DE; AZEVEDO, B. M. DE; SILVA, G.L. DA; COSTA, F. R. B. Estresse salino em plantas de feijão-caupi em solo com fertilizantes orgânicos. **Agro@mbiente On-Line**, v. 8, n. 3, p. 359-367, 2014. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1824> Acesso em: 12 fev. 2024.

STEVERSON, F.J. **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. 2 ed New York: John Wiley, 1994, 496p.

SUKUMARAN, A.; MCDOWELL, T.; CHEN, L.; RENAUD, J.; DHAUBHADEL, S. Isoflavonoid-specific prenyltransferase gene family in soybean: GmPT01, a pterocarpan 2-dimethylallyltransferase involved in glyceollin biosynthesis. **Plant Journal**, v. 96, n. 5, p. 966-981, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30195273/> Acesso em: 06 fev. 2024.

TAHIR, M.M.; KHURSHID, M.; KHAN, M.Z.; ABBASI, M.K.; KAZMI, M.H. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils. **Pedosphere**, v. 21, n. 1, p. 124–131, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016010600872> Acesso em: 21 out. 2023.

TANG, C.; LIU, B.; CHENG, K.; ANTONIETTI, M.; YANG, F. Moderating carbon dynamics in black soil by combined application of biochar and an artificial humic substance. **Land Degradation & Development**, v. 34, n. 5, p. 1352-1362, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez17.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/ldr.4538> Acesso em: 39 jan. 2024.

TIESSEN, H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H. Organic matter turnover and management in low input agriculture of NE Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 99-103, 2001. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-2172-1_10 Acesso em: 29 set. 2023.

TIWARI, J.; RAMANATHAN, A.; BAUDDH, K.; KORSTAD, J. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review. **Pedosphere**, v. 33, n. 2, p. 237-249, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016022000765?via%3Dihub> Acesso em: 11 fev. 2024.

VAN OOSTEN, M. J.; PEPE, O.; De PASCALE, S.; SILLETTI, S.; MAGGIO, A. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1–12, 2017. Disponível em: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-017-0089-5> Acesso em: 22 out. 2023.

VETVICKA, V., BAIGORRI, R., ZAMARREÑO, A.M., GARCIA-MINA, J.M., YVIN, J.C. Glucan and humic acid: synergistic effects on the immune system. **Journal of Medicinal Food**, v. 13, n. 4, p. 863–869, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20553181/> Acesso em: 22 out. 2023.

VOLIKOV, A.B.; KHOLODOV, V.A.; KULIKOVA, N.A.; PHILIPPOVA, O.I.; PONOMARENKO, S.A.; LASAREVA, E.V.; PARFYONOVA, A.M.; HATFIELD, K.; PERMINOVA, I.V. Silanized humic substances act as hydrophobic modifiers of soil separates inducing formation of water-stable aggregates in soils. **Catena**, v. 137, p. 229–236, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816215301223> Acesso em: 25 set. 2023.

XUE, P.; FU, Q.; LI, T.; LIU, D.; HOU, R.; LI, Q.; LI, M.; MENG, F. Effects of biochar and straw application on the soil structure and water-holding and gas transport capacities in seasonally frozen soil areas. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113943, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721020053> Acesso em: 30 jan. 2024.

ZANDONADI, D. B.; SANTOS, M. P.; MEDICI, L. O.; SILVA, J. Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 1, p. 14-20, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/kgCM4D8ZwrFVc4DQMJ6K3fv/> Acesso em: 01 dez. 2023.

ZAVARZINA, A. G.; DANCHENKO, N. N.; DEMIN, V. V.; ARTEMYEVA, Z. S.; KOGUT, B. M. Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review). **Eurasian Soil Science**, v. 54, n. 12, p. 1826-854, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229321120164> Acesso em: 02 nov. 2023.

ZHANG, L., SUN, X., TIAN, Y., GONG, X. Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*. **Scientia Horticulturae**, v. 176, p. 70–78, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423814003379> Acesso em: 07 set. 2023.

ZHAO, J. Flavonoid transport mechanisms: How to go, and with whom. **Plant Science**, v.20, n. 9, p.576-585, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1360138515001685> Acesso em: 06 fev. 2024.

ZHU, J.; WAKISAKA, M. Application of lignosulfonate as the growth promotor for freshwater microalga *Euglena gracilis* to increase productivity of biomass and lipids. **Fuel**, v. 283, 118920, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120319165> Acesso em: 26 jan. 2024.

GLOSSÁRIO

e.g.: abreviação de *exempli gratia*, expressão em latim que significa “por exemplo”.

Efeito *priming*: efeito pré-condicionador da matéria orgânica do solo que auxilia na disponibilidade de nutrientes na solução do solo. Geralmente, esse processo é catalisado pelo acréscimo de matéria orgânica no solo.

i.e.: abreviação de *id est*, expressão em latim que significa “isto é”.