UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**VERMICOMPOSTAGEM COMO TECNOLOGIA APLICADA À VALORIZAÇÃO E
REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE CURTUME:**

**UM ESTUDO QUÍMICO E AGRONÔMICO COM VISTAS À
PRODUÇÃO ORGÂNICA DE PIMENTÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO**

Ramom Rachide Nunes

São Carlos, SP
Março de 2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**VERMICOMPOSTAGEM COMO TECNOLOGIA APLICADA À VALORIZAÇÃO E
REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE CURTUME:**

**UM ESTUDO QUÍMICO E AGRONÔMICO COM VISTAS À
PRODUÇÃO ORGÂNICA DE PIMENTÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO**

Ramom Rachide Nunes

Tese apresentada ao Instituto de Química de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, para obtenção de título de Doutor
em Ciências.

Área de Concentração: Química Analítica e Inorgânica μ

Orientadora: Prof. Dra. Maria Olímpia de Oliveira Rezende

São Carlos, SP
Março de 2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Assinatura: RRachideN

Data: 27/03/2017

Ficha Catalográfica elaborada pela Seção de Referência e Atendimento ao Usuário do SBI/IQSC

Rachide Nunes, Ramom

Vermicompostagem como tecnologia aplicada à valorização e reaproveitamento dos resíduos de curtume: um estudo químico e agrônomo com vistas à produção orgânica de pimentão em ambiente protegido / Ramom Rachide Nunes. — São Carlos, 2017.

279 f.

Tese (Doutorado em Química Analítica e Inorgânica) — Instituto de Química de São Carlos / Universidade de São Paulo, 2017.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Olímpia Oliveira Rezende

1. Vermicompostagem. 2. Resíduos de curtume. 3. Atividade hormono-similar. 4. Pimentão. 5. Agricultura orgânica. I. Título.

O amor no éter

Adélia Prado

Há dentro de mim uma paisagem
entre meio-dia e duas horas da tarde.
Aves pernaltas, os bicos
mergulhados na água,
entram e não neste lugar de memória,
uma lagoa rasa com caniço na margem.
Habito nele, quando os desejos do corpo,
a metafísica, exclamam:
como és bonito!
Quero escrever-te até encontrar
onde segregas tanto sentimento.
Pensas em mim, teu meio-riso secreto
atravessa mar e montanha,
me sobressalta em arrepios,
o amor sobre o natural.
O corpo é leve como a alma,
os minerais voam como borboletas.
Tudo deste lugar
entre meio-dia e duas horas da tarde.

Arte: Guerra e Paz (1952-1956)

Candido Portinari

Aos meus pais João e Leide, meu norte, exemplo e inspiração

À minha avó Maria, in aeternae memoriam

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela natureza e suas ciências.

Aos meus pais João e Leide, por ter suportados meus sonhos e vontade de crescer.

Aos meus irmãos Rôney e Renata, pelo afeto e companheirismo.

À minha orientadora Marió, pela orientação e amizade.

Aos amigos de laboratório Leandro, Livia, Darlan, Dani, Fernanda e Diva, pelo companheirismo e bons momentos juntos.

Aos alunos de iniciação científica Rhaissa, Ticiane, Gustavo, Gabriel e Giovane, por toda ajuda e colaboração.

Aos docentes do IQSC, em especial às professoras Eny e Teca e ao professor Eduardo Bessa, pelos bons momentos de aprendizado e amizade.

Aos técnicos e funcionários do IQSC, em especial à Andreia, Gustavo, Gislei, Daniele, Silvia, Verô, Cláudia, Carlinhos, Bernadete e Eliana pela solicitude, empenho e profissionalismo.

A todos os amigos que fiz ao longo deste doutorado, em especial ao Adriano, Henrique, Rodrigo, Yago, Duda, Lucas, Neuby, Rhenan, Laís, Virgínia, Felipe, Ivan, Nicholas e tantos outros... amigos de festa, batalhas Pokémon, imagem e som, TUSCA, academia, viagens, e tantos outros momentos que tornaram este período mais divertido, quer seja em São Carlos, ou em qualquer outro lugar, agradeço a todos que se fizeram presentes.

Ao professor Wanderley José de Melo pela ajuda e cooperação na área de agronomia.

Aos biólogos Eduardo Habermann e Rafael Tamar pela solicitude, contributo e amizade.

Também ao Rafael Tamar, por ter enriquecido este trabalho com suas ilustrações e arte.

Ao linguista Henrique Regitano, pelas correções e sugestões que tanto contribuíram com este trabalho.

À empresa Daluva por ter gentilmente cedido os resíduos de curtume.

À Universidade de São Paulo e ao Instituto de Química de São Carlos, pela estrutura e oportunidades.

À FAPESP pela bolsa de estudo e financiamento do projeto de pesquisa (Projeto 2013/00744-0).

RINGRAZIAMENTI

Ai mio supervisore dell'Università degli Studi di Milano Fabrizio Adani, per l'opportunità e la collaborazione offerta.

Alle ricercatrici Fulvia e Barbara, per tutto il contributo e l'aiuto.

Ai miei amici dell'UniMi Carlo, Valentina, Samuele, Floriana, Arjana e Martina, per l'amicizia e bei momenti trascorsi insieme.

Ai miei coinquilini, amici e famiglia Elisa, Ila e Francesco, per la tanta amicizia e per gli indimenticabili momenti insieme.

Ai tutti gli amici che ho incontrato in questa mia esperienza a Milano, ed in particolare, Miguel, Luca, Mau, Luigi, Vincenzo, Zhonda, Vanni, Giuseppe, Attilio, Laura, Antonella, e tanti altri...

Ai miei amici di viaggio in Bosnia e nei Balcani, Enza, Michela, Simone, Benve, Claudia, Stefano e, in modo particolare, Eno.

Ad Anthony, per l'amicizia, la compagnia e i piacevoli momenti insieme.

Non vi dimenticherò mai!

All'Università degli Studi di Milano, alla Facoltà di Scienze Agrarie e Alimentare e al Gruppo Ricicla per l'opportunità che mi hanno offerto.

Alla FAPESP per la borsa di studio BEPE (Progetto 2014/05041-0).

RESUMO

NUNES, Ramom Rachide. Vermicompostagem como tecnologia aplicada à valorização e reaproveitamento dos resíduos de curtume: um estudo químico e agrônômico com vistas à produção orgânica de pimentão em ambiente protegido. Tese (Doutorado em Química). Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. 2017. 279 p.

A atividade industrial para produção de couro gera elevada quantidade de resíduos potencialmente poluidores, geralmente ricos em cromo, um elemento tóxico com riscos ao meio ambiente e à saúde humana. Em geral, os resíduos produzidos no beneficiamento e produção do couro — curtume de acabamento — compreendem principalmente uma mistura de raspas e aparas curtidas de couro wet-blue e, também, o lodo das estações de tratamento de efluentes. Uma solução para a problemática ambiental que envolve esses resíduos seria transformá-los em compostos orgânicos nobres, na qual a vermicompostagem foi sugerida como tecnologia alternativa viável. Vermicompostagem é um processo biológico avançado que dá ênfase à ação detritívora das minhocas e dos microrganismos presentes em seu trato digestivo, levando à produção de insumos agrícolas — vermicompostos — de elevada qualidade agrônômica e potencial nutritivo para as plantas e culturas agrícolas. Por sua vez, esses vermicompostos poderiam ser aplicados à agricultura orgânica, familiar ou quaisquer atividades agrícolas de base ecológica. Assim, o presente estudo teve como objetivo aplicar a vermicompostagem no tratamento e reaproveitamento dos resíduos de curtume com vistas ao preparo de insumos para a agricultura orgânica ou de base ecológica, além de realizar um estudo químico, espectroscópico e hormono-bioestimulante dos processos envolvidos, além de aplicar esses insumos no cultivo orgânico de pimentão *Capsicum annuum* L. Para isso, os estudos foram divididos em três capítulos, (1) vermicompostagem aplicada à valorização da matéria orgânica dos resíduos de curtume e preparo dos insumos agrícolas; (2) investigação de quais moléculas presentes na matéria orgânica dissolvida (DOM) e nos ácidos húmicos (HAs) extraídos dos vermicompostos que desempenham papel bioestimulante no que se refere ao efeito hormono-similar e ação auxino-similar em testes de germinação com sementes de *Lactuca sativa*; e (3) aplicação dos vermicompostos no cultivo orgânico de pimentão em ambiente protegido. Ademais, a dinâmica do Cr, da vermicompostagem até seu transporte do substrato à planta foi investigada. De acordo com os resultados obtidos no monitoramento da vermicompostagem, as variações nos valores dos atributos analisados (pH, TOC, MO, relação C:N etc.) indicaram que os vermicompostos atingiram a estabilidade e a maturidade desejada. Ao final da vermicompostagem, todos os valores de Cr (VI) estavam abaixo do limite de quantificação, indicando a bioconversão do Cr (VI) em Cr (III). Quanto à atividade hormono-similar, ambos os extratos de HAs e DOM apresentaram efeito auxino-similar, porém, este efeito foi mais intenso nos HAs, os quais inibiram completamente a germinação das sementes de *L. sativa* nas concentrações mais elevadas. Além disso, amostras com maiores concentrações de aminoácidos e ácidos carboxílicos de cadeias alifáticas e aromáticas foram as mais bioativas. Dados relacionados à aplicação dos vermicompostos indicaram que é possível cultivar pimentão orgânico em ambiente protegido utilizando este insumo agrícola, obtendo-se uma produção de até 3 frutos planta⁻¹, além de plantas saudáveis e bem desenvolvidas. Ao investigar a dinâmica do Cr nas plantas (raiz, caule, folhas etc.), sua maior concentração foi determinada nos frutos, porém abaixo do valor recomendado pela USDA para o consumo humano diário (25,0-35,0 µg Cr dia⁻¹). Assim, considera-se que os pimentões colhidos estão aptos para o consumo humano e não apresentam risco para a saúde e segurança alimentar. Em geral, este estudo reforça a ideia de que a vermicompostagem pode ser introduzida como uma tecnologia eficaz para o tratamento de resíduos de curtume e a produção de insumos agrícolas. Além disso, conclui-se a tese de que os vermicompostos — produzidos a partir de resíduos de curtume — podem ser aplicados no cultivo orgânico do pimentão em ambiente protegido, com bons resultados de produtividade, além do potencial valor de mercado, em virtude da qualidade e aparência dos frutos obtidos.

SOMMARIO

NUNES, Ramom Rachide. Il vermicompostaggio come tecnologia applicata al riciclaggio e riutilizzo dei rifiuti di conceria: uno studio chimico e agronomico per la produzione organica di peperone in serra. Tesi (Dottorato in Chimica). Università di San Paolo, Istituto di Chimica di San Carlo. 2017. 279 p.

L'attività industriale per la produzione di cuoio genera elevata quantità di rifiuti potenzialmente inquinanti, solitamente ricchi di cromo, un elemento tossico con rischi per l'ambiente e la salute umana. In generale, i rifiuti prodotti dalla lavorazione e produzione di pelle — conceria di finitura — comprende un misto di trucioli e scaglie di cuoio wet-blue e anche i fanghi degli impianti di depurazione. Un'alternativa alle problematiche ambientali che coinvolgono questi rifiuti potrebbe essere la trasformazione degli stessi in composti organici nobili, dove il vermicompostaggio si presenterebbe come una scelta valida. Il vermicompostaggio è un processo biologico avanzato che enfatizza l'azione dei lombrichi e di microrganismi nel loro tratto digestivo, che porta alla produzione dei prodotti agricoli, ovvero il vermicomposto, di elevata qualità e potenziale agronomico e nutrizionale per le piante e le colture. Anche questi vermicomposti potrebbero essere applicati all'agricoltura biologica o a qualsiasi attività agricola di base ecologica. Questa relazione, infatti, ha provato ad applicare il vermicompostaggio nel trattamento e nel riciclaggio dei rifiuti di conceria in vista della preparazione dei prodotti per l'agricoltura biologica o di basi ecologiche e, in aggiunta, ha predisposto uno studio chimico, spettroscopico e ormone-biostimolante di tutti i processi coinvolti. Infine, l'applicazione di questi fattori ha comportato la produzione organica del peperone *Capsicum annuum* L. Per questo motivo, gli studi svolti in questa ricerca sono stati divisi in tre capitoli: (1) il vermicompostaggio applicato al riutilizzo della materia organica dei rifiuti di conceria e produzione dei prodotti dell'agricoltura; (2) la ricerca di molecole organiche ottenute nella DOM e nella HAS estratte dai vermicomposti e che hanno un ruolo biostimolante con preciso riguardo all'effetto ormonale simile e l'azione auxino-simile attraverso un test di germinazione con la semina di *Lactuca sativa*; (3) l'applicazione dei vermicomposti nella coltivazione organica di peperone in vivaio. Inoltre, la dinamica del Cr, dal vermicompostaggio al suo trasportare del substrato alla pianta, è stato studiato. Secondo i risultati ottenuti nel monitoraggio del vermicompostaggio, le variazioni degli attributi analizzati (pH, TOC, MO, ragione C:N, ecc.) hanno dimostrato che i vermicomposti hanno raggiunto la maturità e la stabilità desiderata. In merito al Cr, alla fine del vermicompostaggio, tutti i valori di Cr (VI) sono risultati al di sotto del limite di quantificazione (LOQ), indicando una bioconversione del Cr (VI) a Cr (III). Con riguardo all'attività ormonale-simile, gli estratti di HAS e DOM hanno mostrato un effetto auxine-simile, anche se questo effetto è stato più intenso nell'HAS nel quale la germinazione dei semi di *L. sativa* è stata completamente inibita nelle concentrazioni più elevate. Inoltre, i campioni con alte concentrazioni di amminoacidi, acidi carbossilici alifatici e aromatici hanno presentato più bioattività. I dati relativi all'applicazione dei vermicomposti hanno indicato che è possibile la coltivazione organica di peperoni utilizzando questi prodotti agricoli, con la conseguente produzione fino a 3 frutti di pianta⁻¹, come piante sane e ben sviluppate. Interrogando la dinamica del Cr nelle piante (radici, gambo, foglie, ecc.) si è dimostrato che la sua più alta concentrazione è stata determinata nei frutti, però, al di sotto della quantità raccomandata dalla USDA per il consumo umano al giorno (25,0-35,0 ug Cr giorno⁻¹). Pertanto si è ritenuto che i peperoni raccolti siano idonei al consumo umano e senza alcun rischio per la salute e la sicurezza alimentare. Concludendo, questo studio ha consolidato l'idea che il vermicompostaggio può essere introdotto come nuova tecnologia efficace e adeguata nel trattamento dei rifiuti di conceria e per la produzione dei prodotti agricoli. Inoltre, la ricerca si è conclusa dimostrando che i vermicomposti — prodotti a partire dagli scarti di conceria — possono essere applicati nella coltivazione biologica di peperone, con risultati di produttività soddisfacenti e con un notevole potenziale valore di mercato dovuto alla qualità e l'aspetto dei frutti ottenuti.

ABSTRACT

NUNES, Ramom Rachide. Vermicomposting as technology applied to the recycling and reuse of tannery waste: a chemical and agronomic study aimed at the organic production of sweet pepper in greenhouse. Thesis (Doctorate in Chemistry). University of São Paulo, Chemistry Institute of São Carlos. 2017, 279 p.

The industrial activity for leather production generates a high amount of potential polluting wastes, usually rich in chromium, a toxic element with risks to the environment and human health. In general, the wastes produced during the production of leather — finishing tannery — mainly comprises a mixture of tanned chips of leather wet-blue and also the sludge from the plant of effluent treatment. An alternative to the environmental problem involving these residues would be to convert them into noble organic compounds, and for that purpose the vermicomposting was suggested as a viable alternative technology. Vermicomposting is an advanced biological process which emphasizes the detritivore action of the earthworms and microorganisms present in their digestive tract, leading to the production of agricultural inputs — vermicompost — with high agronomic quality and nutritional potential for the plants and agricultural crops. In addition, these vermicomposts could be applied to organic, family farming or any ecologically based agricultural activities. Thus, the present study aimed to apply the vermicomposting in the treatment and reutilization of tannery waste for the preparation of inputs for organic farming, in addition to conducting a chemical, spectroscopic, and hormone-biostimulating study of the processes involved, furthermore to applying these inputs in the organic cultivation of *Capsicum annuum* L. For this, the studies were divided in three chapters, (1) vermicomposting applied to the valorization of the organic matter of the tannery residues and the preparation of the agricultural inputs; (2) investigation of organic molecules determined in the vermicomposted DOM and HAs with any biostimulating role regarding to the hormone-like effect and auxin-like action under germination tests with *Lactuca sativa* seeds; and (3) application of the vermicomposts in the organic cultivation of sweet pepper in greenhouse. In addition, the Cr dynamics, since the vermicomposting until its transport from the substrate to the plant, was investigated. According to the results obtained in the vermicompost monitoring, the variations in the values of the analyzed attributes (pH, TOC, OM, C:N ratio, etc.) indicated that the vermicomposts reached the stability and the desired maturity. For the Cr, at the end of the vermicomposting, all values of Cr (VI) were below the detectable level, indicating the Cr (VI) bioconversion into Cr (III). Regarding the hormone-like activity, both extracts of HAs and DOM showed an auxin-like effect, but this effect was more intense in HAs, which completely inhibited the germination of *L. sativa* seeds at higher concentrations. In addition, samples with higher concentrations of amino acids and carboxylic acids with aliphatic and aromatic chains were the most bioactive. Data related to vermicompost application indicated that it is possible to cultivate organic sweet pepper using this agricultural input, obtaining a production up to 3 fruits plant⁻¹, as well as healthy and well-developed plants. When investigated the Cr dynamics in the plants (egg, root, stem, leaves), its highest concentration was determined in the fruits, but below the value recommended by the USDA for daily human ingesting (25.0-35.0 µg Cr day⁻¹). Consequently, the harvested sweet peppers are suitable for human consumption and do not present risks to food security and human health. In general, these findings reinforce the idea that the vermicomposting can be introduced as an effective technology in the treatment of the tannery waste and the production of agricultural inputs. In addition, we concluded that the vermicomposts — produced along the tannery residues — can be applied in the organic cultivation of sweet pepper in greenhouse, resulting in a good productivity rate and potentially marketable produce, due to the appearance and quality of the obtained sweet peppers.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I — Vermicompostagem aplicada à valorização da matéria orgânica dos resíduos de curture	25
Introdução	35
Objetivos	47
Materiais e Métodos	48
Resultados	54
Discussão	82
Conclusão	86
Referências Bibliográficas	87
 CAPÍTULO II — Atividade hormono-similar dos vermicompostos	 91
Introdução	99
Objetivos	11
Materiais e Métodos	112
Resultados	118
Discussão	154
Conclusão	158
Referências Bibliográficas	159
 CAPÍTULO III — Produção orgânica de pimentão em ambiente protegido	 165
Introdução	177
Objetivos	190
Materiais e Métodos	191
Resultados	197
Discussão	249
Conclusão	256
Referências Bibliográficas	257
 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 265
Conclusão Final	269
M1 — Metodologias para análises químicas	271
M2 — Metodologias para determinação do Cr	273
M3 — Validação de metodologia Analítica	274
M4 — Outras metodologias de análise	276

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATÖES

%LPG	Ganho percentual de tamanho, do inglês Length percentage gain
%V	Saturação por bases
%WPG	Ganho percentual de massa, do inglês Weight percentage gain
α —OH	alfa-Hidroxiácidos
^{13}C CPMAS-NMR	Ressonância magnética nuclear de ^{13}C por polarização cruzada e rotação no ângulo mágico, do inglês nuclear magnetic resonance of ^{13}C with cross polarization in the magic angle spinning
A	Acidez trocável
A	Aparas e raspas curtidas de couro wet-blue
AA	Aminoácidos
AAS	Espectrometria de absorção atômica, do inglês Atomic absorption spectrometry
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGRO CIM	Centro de Inteligência em Mercados Agropecuários
AIA	Ácido indol-3-acético
AL	Mistura do lodo da estação de tratamento de efluentes e aparas e raspas curtidas de couro wet-blue
Ali—COOH	Ácidos carboxílicos de cadeia alifáticos
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
Ar—COOH	Ácidos carboxílicos de cadeia aromática
B	Bases trocáveis
CEE	Comunidade Econômica Europeia
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CHex—COOH	Ácido carboxílico de cadeia cíclica (ciclo hexano)
CHNO	Análise elementar: carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio
CICB	Centro das Indústrias de Curtumes do Brasil
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de troca catiônica
DBO	Demanda biológica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
DOM	Matéria orgânica dissolvida, do inglês Dissolved organic matter
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F	Vermicomposto fresco
HAs	Ácidos húmicos
HF _s	Ácidos fúlvicos
IFOAM	Federação Internacional do Movimento de Agricultura Orgânica, do inglês International Federation of the Organic Agriculture Movement
IHSS	Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas, do inglês International Humic Substances Society
IOM	Instituto de Medicina, do inglês Institute of Medicine
ISO	Organização Internacional para Padronização, do inglês International Organization for Standardization
L	Lodo da estação de tratamento de efluentes
LA _d	Latossolo amarelo distrófico
LI	Índice de comprimento, do inglês Length index
LOD	Limite de detecção, do inglês Limit of detection

LOQ	Limite de quantificação, do inglês Limit of quantitation
LQA	Laboratório de Química Ambiental
NBR	Norma Brasileira
M	Vermicomposto maduro
MAE	Extração assistida por micro-ondas, do inglês Microwave assisted extraction
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MO	Matéria orgânica
MS	Monossacarídeos
Nuc	Nucleotídeos
Poli—OH	Poliálcoois
PROTESTE	Associação Brasileira de Defesa do Consumidor
PSD	Distribuição das frações granulométricas, do inglês Particle size distribution
R ²	Coeficiente de determinação
S	Vermicomposto estável, do italiano Stabile
SH	Substâncias húmicas
SO	Substrato orgânico
ST	Sólidos totais
TOC	Carbono orgânico total, do inglês Total organic carbon
UN FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, do inglês Food and Agriculture Organization of the United Nations
VCT	Variação do tempo de contato, do inglês Variable contact time

CAPÍTULO I

VERMICOMPOSTAGEM APLICADA À VALORIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DOS RESÍDUOS DE CURTUME

UM ESTUDO QUÍMICO DA DINÂMICA DO PROCESSO

O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são

Aristóteles

RESUMO DO CAPÍTULO I

NUNES, Ramom Rachide. Capítulo I — Vermicompostagem aplicada à valorização da matéria orgânica dos resíduos de curtume: estudo químico da dinâmica do processo. In: Vermicompostagem como tecnologia aplicada à valorização e reaproveitamento dos resíduos de curtume: um estudo químico e agrônômico com vistas à produção orgânica de pimentão em ambiente protegido. Tese (Doutorado em Química). Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. 2016. p. 25-90.

Este capítulo apresenta a vermicompostagem como alternativa para a reciclagem e tratamento dos resíduos obtidos durante a produção industrial do couro. A vermicompostagem é um processo biológico avançado que consiste na biotransformação e estabilização da matéria orgânica e pode ser aplicada no reaproveitamento de resíduos agrícolas, organo-industriais e organo-urbanos. Os vermicompostos foram produzidos a partir dos seguintes resíduos de curtume: aparas e raspas curtidas de couro wet-blue, o lodo da estação de tratamento de efluentes líquido, e uma mistura de ambos os resíduos. Junto aos resíduos de curtume foram adicionados esterco bovino e serragem (substrato orgânico). Para a produção dos vermicompostos, 500 minhocas *Eisenia fetida* foram adicionadas a cada amostra. Durante os 135 dias de experimento foram avaliados os seguintes atributos: sólidos totais (ST), pH, carbono orgânico total (TOC), matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), relação C:N, e os teores de cromo, tais como Cr total e o Cr disponível — Cr (III) e Cr (VI). Os resultados para o pH, TOC, MO e relação C:N mostraram decréscimos em seus valores durante o processo de compostagem, enquanto que os valores de CTC e N aumentaram, indicando que os vermicompostos atingiram a estabilidade e a maturidade desejada. Para o cromo, em 135 dias, todos os valores de Cr (VI) estavam abaixo do limite de quantificação (LOQ). A bioconversão do Cr (VI) em Cr (III) confirma a possibilidade do uso e a eficiência da vermicompostagem como tratamento biológico avançado. Este estudo reforça a ideia de que a vermicompostagem pode ser introduzido como uma tecnologia eficaz para o tratamento de resíduos de curtume e a produção de insumos agrícolas.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	35
1.1.	Indústria de couro (curtumes)	35
1.1.1.	Ribeira	35
1.1.2.	Curtimento	35
1.1.3.	Acabamento	37
1.1.4.	Tipos de curtume.....	37
1.1.5.	Resíduos de curtume	38
1.2.	Gerenciamento de resíduos	42
1.3.	Fertilizantes orgânicos	43
1.4.	Vermicompostagem	44
2.	OBJETIVOS DO CAPÍTULO I	47
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1.	Resíduos Frescos	48
3.1.1.	Resíduos de curtume	48
3.1.2.	Esterco bovino.....	49
3.1.3.	Serragem.....	49
3.2.	Caracterização dos resíduos frescos	49
3.3.	Montagem dos experimentos — Vermicompostores	49
3.4.	Monitoramento da vermicompostagem	51
3.4.1.	Monitoramento das minhocas <i>E. fetida</i>	52
3.4.2.	Monitoramento químico.....	52
3.5.	Análise e testes estatísticos dos dados	53
4.	RESULTADOS	54
4.1.	Caracterização dos resíduos frescos	54
4.2.	Monitoramento das minhocas <i>E. fetida</i>	55
4.2.1.	Ganho percentual de massa (%WPG)	58
4.2.2.	Ganho percentual de tamanho (%LPG)	58
4.3.	Monitoramento da vermicompostagem	61
4.3.1.	Temperatura	61
4.3.2.	Sólidos totais (ST)	63
4.3.3.	pH.....	65
4.3.4.	Matéria Orgânica (MO).....	65
4.3.5.	Carbono orgânico total (TOC)	65
4.3.6.	Capacidade de troca catiônica (CTC)	69
4.3.7.	Relação C:N	74
4.4.	Monitoramento do Cr.....	78
4.5.	RESUMO — Atributos químicos e de fertilidade dos vermicompostos	81

5.	DISCUSSÃO	82
5.1.	Caracterização dos resíduos frescos	82
5.2.	Monitoramento das minhocas <i>E. fetida</i>	83
5.3.	Monitoramento da vermicompostagem	83
5.4.	Monitoramento do Cr.....	84
6.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO I.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — I.	Etapas operacionais para produção de couro a partir de pele salgada (ou couro cru): ribeira, curtimento e acabamento.	36
Figura 2 — I.	Produto da reação entre o $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$ e as fibras de colágeno da pele salgada, formando redes inter cruzadas unidas por ligações químicas, resultando no couro curtido wet-blue.	37
Figura 3 — I.	Fluxo típico de reagentes e produtos para o curtimento de 1,0 t de couro salgado (pele fresca) para produção de couro acabado. Valores aproximados.	38
Figura 4 — I.	Etapas de obtenção e tratamento dos efluentes líquidos gerados na etapa de acabamento do couro wet-blue. Imagens obtidas na empresa DALUVA Comércio e Acabamento de Couros LTDA, localizada no município de Bocaina (SP); a. Fulões utilizados no tingimento do couro wet-blue; b. Lavagem do couro em cavaletes suspensos; c. Estação de tratamento dos efluentes líquidos; d. Tabletes formados após a secagem do lodo.	40
Figura 5 — I.	Obtenção e empacotamento dos resíduos sólidos obtidos na etapa de acabamento do couro wet-blue. Imagens obtidas na empresa DALUVA Comércio e Acabamento de Couros LTDA, localizada no município de Bocaina (SP); a. Processamento mecânico do couro wet-blue nas etapas de recorte, lixamento e desemoamento; b. Raspas, aparas, farelos e serragem obtidos no processamento do couro wet-blue; c. Resíduo compactado e ensacado para transporte para o aterro controlado.	41
Figura 6 — I.	Resíduos de curtume utilizados no preparo dos vermicompostos.	48
Figura 7 — I.	Vermicompostores construídos para realização dos experimentos de vermicompostagem.	50
Figura 8 — I.	Horizontes dos resíduos frescos utilizados na construção dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL). Para a construção dos vermicompostores VRC—STD foram omitidos os horizontes contendo os resíduos de curtume.	51
Figura 9 — I.	Desenvolvimento típico das minhocas <i>E. fetida</i> durante a vermicompostagem de uma amostra (VRC—L1) nos tempos 0, 30, 90 e 135 dias.	56
Figura 10 — I.	Histórico de eventos ocorridos durante a vermicompostagem.	57
Figura 11 — I.	Ganho percentual de massa (%WPG) das minhocas <i>E. fetida</i> durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD), nos tempos 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias.	59
Figura 12 — I.	Ganho percentual de tamanho (%LPG) das minhocas <i>E. fetida</i> durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD), nos tempos 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias.	60
Figura 13 — I.	Monitoramento da temperatura dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A, VRC—AL e VRC—STD) e, também, a variação da temperatura ambiente, durante o processo de vermicompostagem.	63
Figura 14 — I.	Monitoramento dos sólidos totais durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	64

Figura 15 — I.	Monitoramento do pH durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	66
Figura 16 — I.	Monitoramento da matéria orgânica (MO) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	67
Figura 17 — I.	Monitoramento do carbono orgânico total (TOC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	68
Figura 18 — I.	Monitoramento da acidez trocável (A) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	70
Figura 19 — I.	Monitoramento das bases trocáveis (B) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	71
Figura 20 — I.	Monitoramento da capacidade de troca catiônica (CTC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	72
Figura 21 — I.	Monitoramento da saturação por bases (V%) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	73
Figura 22 — I.	Monitoramento do teor de carbono — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	75
Figura 23 — I.	Monitoramento do nitrogênio — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3).	76
Figura 24 — I.	Monitoramento da relação C:N durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	77
Figura 25 — I.	Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem da amostra VRC—L, nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	78
Figura 26 — I.	Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem da amostra VRC—A, nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	79
Figura 27 — I.	Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem da amostra VRC—AL, nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — I.	Características típicas dos efluentes líquidos gerados por etapa geradora do processo (ribeira, curtimento, pré-acabamento e acabamento). Cálculos baseados em kg de resíduo por t de pele salgada.	39
Tabela 2 — I.	Principais resíduos sólidos gerados por etapa geradora do processo (ribeira e acabamento). Cálculos baseados em kg de resíduo por t de pele salgada.	39
Tabela 3 — I.	Características químicas dos resíduos frescos: resíduos de curtume (lodo e aparas), esterco e serragem (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).	54
Tabela 4 — I.	Teor de Cr total e Cr disponível — Cr (III) e Cr (VI) — obtidos na caracterização dos resíduos frescos: resíduos de curtume (lodo e aparas), esterco e serragem.	55
Tabela 5 — I.	Ganho percentual de massa (%WPG) das minhocas <i>E. fetida</i> durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD) (média ± DP, n = 3). Unidades em %.	59
Tabela 6 — I.	Ganho percentual de tamanho (%LPG) das minhocas <i>E. fetida</i> durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD) (média ± DP, n = 3). Unidades em %.	60
Tabela 7 — I.	Monitoramento dos sólidos totais (ST) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.	64
Tabela 8 — I.	Monitoramento do pH durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3).	66
Tabela 9 — I.	Monitoramento da matéria orgânica (MO) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.	67
Tabela 10 — I.	Monitoramento do carbono orgânico total (TOC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em mg kg ⁻¹	68
Tabela 11 — I.	Monitoramento da acidez trocável (A) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em cmol _c kg ⁻¹	70
Tabela 12 — I.	Monitoramento das bases trocáveis (B) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em cmol _c kg ⁻¹	71
Tabela 13 — I.	Monitoramento da capacidade de troca catiônica (CTC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em cmol _c kg ⁻¹	72

Tabela 14 — I.	Monitoramento da saturação por bases (V%) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).	73
Tabela 15 — I.	Monitoramento do teor de carbono — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.	75
Tabela 16 — I.	Monitoramento do nitrogênio — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.	76
Tabela 17 — I.	Monitoramento da relação C:N durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).	77
Tabela 18 — I.	Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em mg kg ⁻¹	80
Tabela 19 — I.	RESUMO — Atributos químicos e de fertilidade dos vermicompostos preparados a partir resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD) (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).....	81

1. INTRODUÇÃO

1.1. Indústria de couro (curtumes)

Importante seguimento da indústria brasileira, o setor de couro possui aproximadamente 450 curtumes em todo país. Destas unidades, 80% são consideradas de pequeno porte, contratando entre 20 e 99 funcionários diretos. Em 2013, a produção brasileira de couro bovino foi de cerca de 44,7 mil toneladas, tornando o Brasil o quarto país no ranking da produção mundial, atrás da China (209,8), Índia (52,7) e Itália (51,7 mil toneladas) (UN-FAO, 2013; CETESB, 2005).

Em 2011, o setor brasileiro do couro faturou 3,8 milhões de dólares contra os 3,4 obtidos em 2010, de acordo com dados do Centro das Indústrias de Curtumes do Brasil (CICB).¹ Neste período, foram abatidas 44 milhões de cabeça de gado, mantendo o Brasil na segunda posição mundial na produção de couro cru — depois da China e dos Estados Unidos (UN-FAO, 2013; AGRO-CIM, 2011).

Em geral, couro é a pele animal que passou por processos de limpeza, de estabilização (dada pelo curtimento) e de acabamento, para a confecção de calçados, peças de vestuário, revestimentos de mobília, estofamentos de automóveis, bem como outros artigos e bens de consumo (CETESB, 2005).

O processo que transforma as peles em couros é normalmente dividido em três etapas: ribeira, curtimento e acabamento (Figura 1 – I). Os itens a seguir apresentam estas etapas, suas finalidades e características sob os aspectos químicos, físicos e biológicos (CETESB, 2005).

1.1.1. Ribeira

O processo de produção do couro se inicia com a etapa de ribeira. Esta etapa tem como finalidades a limpeza e a eliminação das diferentes partes e substâncias das peles que são indesejáveis à constituição do couro final, bem como preparar sua matriz de fibras colagênicas — estruturas proteicas — para reagir adequadamente com os produtos químicos das etapas seguintes, curtimento e acabamento (CETESB, 2005).

Antes de entrarem na ribeira, as peles são classificadas em função de seu peso e, por vezes, dos tipos de couros a serem produzidos, originando lotes de peles para processamento (CETESB, 2005).

Normalmente, as etapas que envolvem os tratamentos químicos das peles (banhos), são realizadas em equipamentos chamados fulões, e tem como finalidade a limpeza e condicionamento das fibras colagênicas. Fulões são cilindros horizontais fechados, normalmente de madeira, dotados de dispositivos para rotação em torno de seu eixo horizontal, com porta na superfície lateral para carga e descarga das peles, bem como para adição dos produtos químicos (CETESB, 2005).

As outras etapas da ribeira são mecânicas, realizadas manualmente e em máquinas específicas. Basicamente, procura-se remover impurezas aderidas à superfície interna das peles, tais como gorduras, carnes e apêndices — etapas pré-descarne e descarne — além de fazer alguns ajustes nas extremidades das peles (recortes) (CETESB, 2005).

1.1.2. Curtimento

Curtimento é o processo que consiste na transformação das peles, pré-tratadas na ribeira, em materiais estáveis e imputrescíveis. Ou seja, é a etapa na qual as peles são transformadas em couro. O curtimento pode ser classificado em três tipos principais: mineral, vegetal e sintético. Normalmente, esta etapa também é realizada em fulões (CETESB, 2005).

¹ Dados do último relatório estatístico da CICB (2010-2011)

i. RIBEIRA	ii. CURTIMENTO	iii. ACABAMENTO	iv.
Conservação _{S L G}	Lavagem _L	Tingimento _L	EXPEDIÇÃO – TRANSPORTE
Classificação e Pesagem	Descalcinação e Purga _{L G}	Engraxe _L	
Pré-remolho _L	Lavagem _L	Cavalete _L	
Pré-descarne _{S L}	Píquel e Curtimento _L	Estiramento _L	
Remolho _L	Descanso _L	Secagem	
Depilação e Caleiro _{S L G}	Enxugamento _L	Condicionamento	
Lavagem _L	Rebaixamento e Recorte _s	Amaciamento	
Descarne _{S L}	Neutralização _L	Esqueamento	
Recorte _s	Recurtimento _L	Recorte _s	
Divisão _L	Tingimento _L	Lixamento _s	
	Engraxe _L	Desempoamento _s	
		Impregnação _G	
		Acabamento _G	
		Prensagem	
		Medição	

Figura 1 — I. Etapas operacionais para produção de couro a partir de pele salgada (ou couro cru): ribeira, curtimento e acabamento.

LEGENDA: Etapas com geração de S resíduos sólidos; L resíduos líquidos; G resíduos gasosos.

FONTE: Adaptado de Class e Maia (1994), citado por CETESB (2005).

No curtimento mineral, o processo ao cromo ainda é o mais utilizado mundialmente, o qual se destaca pelo tempo relativamente curto e pela qualidade que confere aos couros. Geralmente, o curtente (reagente responsável pelo curtimento) é o sulfato básico de cromo, $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$. O produto de sua reação com as fibras da pele animal é o couro wet-blue, termo relacionado ao aspecto úmido e azulado que o couro adquire após o curtimento ao cromo (Figura 2 — I) (CETESB, 2005).

O curtimento vegetal é realizado com taninos obtidos em extratos vegetais. Geralmente é utilizado para produção de solas e de alguns tipos especiais de couro, bem como em combinação com outros tipos de curtimento. Devido ao seu alto custo, a mesma solução de taninos é utilizada no máximo de banhos possíveis. Na maioria das vezes, faz-se apenas a reposição de solução para o lote de peles seguinte, para compensar a parte absorvida pelas peles do lote anterior. Com o aumento do uso de materiais sintéticos na fabricação de solas, o curtimento vegetal de couro para este fim diminuiu significativamente (CETESB, 2005).

No curtimento sintético são empregados curtentes orgânicos, tais como resinas, taninos sintéticos etc., que proporcionam um curtimento mais uniforme e aumentam a penetração de outros curtentes, o que propicia um melhor tingimento posterior. Geralmente são mais caros e são utilizados como auxiliares de outros processos de curtimento (CETESB, 2005).

Figura 2 — I. Produto da reação entre o $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$ e as fibras de colágeno da pele salgada, formando redes inter cruzadas unidas por ligações químicas, resultando no couro curtido wet-blue.

FONTE: Autoria própria.

1.1.3. Acabamento

O processo de acabamento do couro wet-blue é subdividido em três etapas: acabamento molhado, pré-acabamento e acabamento final (CETESB, 2005).

O acabamento molhado (ou pós-curtimento) corresponde às etapas desde o descanso ou enxugamento até o engraxe dos couros. Estas etapas visam a complementar o curtimento principal, bem como conferir algumas propriedades físicas e mecânicas desejáveis aos couros, como cor básica, resistência à tração, impermeabilidade, maciez, flexibilidade, toque e elasticidade. Descanso, enxugamento, rebaixamento e recorte são operações mecânicas, enquanto que as demais são banhos realizados em fulões (CETESB, 2005).

O pré-acabamento vai desde as operações em cavaletes, estiramento e secagem até a impregnação, todas operações mecânicas. Na etapa de impregnação aplicam-se polímeros termoplásticos, manualmente ou por meio de máquinas específicas, à superfície dos couros. Estas operações têm a finalidade de dar algumas das propriedades físicas finais ao produto (CETESB, 2005).

O acabamento final é o conjunto de etapas que confere ao couro apresentação e aspecto definitivo. Compreende as três operações finais antes da expedição ou estoque dos couros acabados: acabamento, prensagem e medição (CETESB, 2005).

1.1.4. Tipos de curtume

O processo industrial para produção de bens de consumo à base de couro contempla todas as etapas acima descritas. Porém, existem curtumes que realizam apenas algumas destas operações. Neste caso, os curtumes são classificados em função das unidades de produção (CETESB, 2005).

- i. Curtume integrado: capaz de realizar todas as operações necessárias para transformação da pele fresca ou salgada em couro totalmente acabado.

- ii. Curtume de wet-blue: processa desde o couro cru até o curtimento ao cromo ou descanso e enxugamento, após o curtimento.
- iii. Curtume de semi-acabado: utiliza o couro wet-blue como matéria-prima e o transforma em couro semi-acabado, também chamado de crust.
- iv. Curtume de acabamento: transforma o couro crust em couro acabado. Nesta etapa também estão incluídas as etapas de tingimento e tinturaria em geral.

1.1.5. Resíduos de curtume

No que se refere à produção do couro, de acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), para cada 1,0 t de pele salgada submetida ao processo de curtimento, utilizam-se ~ 500,0 kg de produtos químicos e 15,0-40,0 m³ de água são utilizados. Como produto, esse processo industrial gera apenas 200,0 kg de couro curtido (20% de rendimento) e 800,0 kg de resíduos sólidos, os quais são ricos em Cr e matéria orgânica (MO). Além disso, o efluente líquido produzido contém uma elevada DQO e DBO (9,0 e 6,0 kg m⁻³, respectivamente), entre outros contaminantes (CETESB, 2005). Devido a estas características, os curtumes estão entre as indústrias mais poluentes do setor de bens de consumo (Figura 3 — I).

ENTRADA		SAÍDA	
Couro salgado t	1,0	Couro acabado kg	200,0-250,0
Produtos químicos kg	~ 500,0	Efluente Líquido m ³	15,0-40,0
Água m ³	15,0-40,0	DQO kg m ⁻³	6,0-9,0
Energia kWh	2.600,0-11.700,0	DBO kg m ⁻³	3,0-6,0
		Sólidos suspensos kg m ⁻³	2,0-4,0
		Cr kg m ⁻³	6,0-13,0
		Resíduos Sólidos kg	~ 450,0-730,0
		Aparas e raspas não curtidas kg	~ 120,0
		Carnaça kg	~ 70,0-350,0
		Rebarbas, tiras e pó de rebaixadeira kg	~ 225,0
		Pó de lixa kg	~ 2,0
		Aparas e raspas curtidas kg	~ 30,0
		Lodo do tratamento de efluentes kg	~ 500,0
		Poluentes atmosféricos kg	~ 40,0

Figura 3 — I. Fluxo típico de reagentes e produtos para o curtimento de 1,0 t de couro salgado (pele fresca) para produção de couro acabado. Valores aproximados.

LEGENDA: DQO Demanda Química de Oxigênio, DBO Demanda Biológica de Oxigênio.

FONTE: Adaptado de IPPC (2003), citado por CETESB (2005).

As tabelas a seguir apresentam as características típicas dos efluentes líquidos gerados em cada etapa do processo: ribeira, curtimento, pré-acabamento e acabamento (Tabela 1 – I) e, também, os principais resíduos sólidos gerados nas etapas de ribeira e acabamento (Tabela 2 – I).

Tabela 1 — I. Características típicas dos efluentes líquidos gerados por etapa geradora do processo (ribeira, curtimento, pré-acabamento e acabamento). Cálculos baseados em kg de resíduo por t de pele salgada.

	Ribeira	Curtimento	Pré-Curtimento	Acabamento	Total
Volume de efluente $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$	7-25	1-3	4-8	0,1	12-37
DQO kg t^{-1}	120-160	10-20	15-40	0-10	145-230
DBO kg t^{-1}	40-60	3-7	5-15	0-4	48-86
Sólidos Suspensos kg t^{-1}	70-120	5-10	1-10	0-5	85-155
Cr (III) kg t^{-1}	—	2-5	1-2	—	3-7

LEGENDA: DQO Demanda Química de Oxigênio, DBO Demanda Biológica de Oxigênio.

FONTE: Class e Maia (1994), citado por CETESB (2005).

Tabela 2 — I. Principais resíduos sólidos gerados por etapa geradora do processo (ribeira e acabamento). Cálculos baseados em kg de resíduo por t de pele salgada.

	Tipo de Resíduo	Volume Gerado kg t^{-1}
Ribeira		
Pré-descarne e/ou Descarne	Carnaça	70-350
Recortes e Divisão	Aparas não caleadas e caleadas	120
Acabamento		
Rebaixamento	Farelo ou serragem de rebaixadeira e aparas curtidas	225

FONTE: Class e Maia (1994), citado por CETESB (2005).

O estudo realizado durante esse doutorado foi feito em parceria com a empresa DALUVA Comércio e Acabamento de Couros LTDA, localizada no município de Bocaina (SP). Esse curtume é classificado, segundo a CETESB, como um curtume de acabamento, ou seja, a empresa adquire o couro cru que, neste caso, são peles de bovinos recém abatidos em abatedouros locais, e as transforma em couro finalizado. As etapas de ribeira e curtimento são realizadas em curtumes terceirizados. Assim, segundo a empresa, evita-se a problemática ambiental que envolve a etapa de curtimento químico, que é a mais poluente, além de ser lucrativo para o seguimento industrial.

Em resumo, os resíduos mais importantes e gerados em maior quantidade no curtume DALUVA LTDA são:

- i. Efluentes líquidos: são resíduos obtidos no tingimento — em fulões — do couro wet-blue (Figura 4.a — I), seguido pelo enxágue e cavalete (Figura 4.b — I). O efluente é drenado para uma estação de tratamento de efluentes, onde recebe o tratamento adequado (Figura 4.c — I). Por último, o lodo é seco ao ar e adquire a forma de tablets (Figura 4.b — I). Esses tablets foram o nosso objeto de estudo. De acordo com a empresa, o lodo seco é estocado e seu destino final são os aterros industriais. O transporte e condicionamento desses resíduos são terceirizados.

- ii. Resíduos sólidos: são raspas, aparas, farelos e serragem obtidos no recorte, lixamento e desemoamento do couro wet-blue (Figura 5.a — I). Estes resíduos são bastante leves, pouco densos e gerados em grandes volumes (Figura 5.b — I). Todo esse material é compactado, ensacado e transportado para aterro industrial (Figura 5.c — I). O serviço de transporte e a disposição final também são terceirizados.

a.

b.

c.

d.

Figura 4 — I. Etapas de obtenção e tratamento dos efluentes líquidos gerados na etapa de acabamento do couro wet-blue. Imagens obtidas na empresa DALUVA Comércio e Acabamento de Couros LTDA, localizada no município de Bocaina (SP); a. Fulões utilizados no tingimento do couro wet-blue; b. Lavagem do couro em cavaletes suspensos; c. Estação de tratamento dos efluentes líquidos; d. Tabletes formados após a secagem do lodo.

a.

b.

c.

Figura 5 — I. Obtenção e empacotamento dos resíduos sólidos obtidos na etapa de acabamento do couro wet-blue. Imagens obtidas na empresa DALUVA Comércio e Acabamento de Couros LTDA, localizada no município de Bocaina (SP); a. Processamento mecânico do couro wet-blue nas etapas de recorte, lixamento e desempoamento; b. Raspas, aparas, farelos e serragem obtidos no processamento do couro wet-blue; c. Resíduo compactado e ensacado para transporte para o aterro controlado.

FONTE: Autoria própria.

1.2. Gerenciamento de resíduos

A geração de resíduos é inerente a toda atividade humana. De acordo com a definição estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira (NBR) 10004 de 2004 — se tratando em particular dos resíduos sólidos — temos que (ABNT, 2004):

“Resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica (domiciliar), hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e econômicas inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Por meio dessa norma, considera-se que neste trabalho foram utilizados apenas resíduos sólidos, uma vez que o efluente líquido, após tratado, adquiriu forma sólida e rígida (lodo da estação de tratamento). Em geral, os resíduos sólidos podem ser classificados em (ABNT, 2004):

- i. Classe I — Resíduos perigosos: São enquadrados como resíduos perigosos aqueles que pelas suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou incidência de doenças ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- ii. Classe II — Resíduos não perigosos.

Os resíduos não perigosos são subdivididos em mais dois grupos, os inertes e não inertes:

- ii.i. Classe II A — Resíduos não inertes: São aqueles que não se enquadram na classificação de resíduos perigosos, assim como não são considerados inertes. Aos resíduos da classe II A são permitidas algumas propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- ii.ii. Classe II B — Resíduos inertes: São classificados como resíduos inertes aqueles que quando amostrados de forma representativa, conforme a ABNT NBR 10.007 e submetidos a um contato estático e dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, de acordo com a ABNT NBR 10.006, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos Padrões de Potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

De acordo com os padrões de potabilidade de água, a resolução CONAMA 357 de 2005 estabelece como padrão de qualidade da água doce o valor máximo permitido de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ de Cr total. Já a CONAMA 430 de 2011 — norma que altera e complementa a CONAMA 357 — estabelece como padrão de lançamento de efluentes o valor máximo permitido de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Cr (III) e $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de Cr (VI) (BRASIL, 2005, 2011).

Por geralmente possuir concentração de Cr acima destes valores e apresentar reatividade, toxicidade, patogenicidade etc., os resíduos sólidos investigados neste estudo — lodo e aparas curtidas — são classificados como sendo de Classe I. De acordo com a norma, tais resíduos devem ser condicionados em aterro sanitário.

Contudo, a matéria orgânica (MO) desses resíduos poderia ser valorizada, agregando valor àquele passivo ambiental e produzindo assim um novo material ou produto comercial. Uma alternativa para a reciclagem e reuso destes

resíduos é a produção de fertilizantes orgânicos. Estes insumos poderiam ser aplicados ao solo para a produção de plantas de interesse econômico, melhorando sua qualidade e respectiva produtividade (Nunes et al., 2016; Vig et al., 2011; Ramesh et al., 2006, 2009).

1.3. Fertilizantes orgânicos

Atualmente, fala-se muito em sustentabilidade. Este termo foi impulsionado na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo no ano de 1972, atenta à necessidade de critérios e princípios comuns que ofereçam inspiração aos povos do mundo e um guia para preservar e melhorar o ambiente humano (Melo et al., 2015).

Baseado nisso — inspirados pelos princípios da sustentabilidade — neste trabalho destacam-se duas preocupações ambientais voltadas às práticas agrícolas e à produção de alimentos (Melo et al., 2015):

- i. A predominância da agricultura convencional, caracterizada sobretudo pelo uso exacerbado de agrotóxicos e pelo preparo excessivo do solo, a qual tem levado a pesquisas acerca da saúde humana e dos impactos sobre o ambiente;
- ii. A elevada produção e estocagem de resíduos urbanos, agrícolas e industriais, além dos lodos de esgoto e efluentes industriais.

É crescente a procura pela redução dos impactos ambientais causados por esses passivos ambientais. Porém, ainda é um grande desafio a ser enfrentado em virtude dos impactos ambientais por eles causados, devido a sua ecotoxicidade. A partir destas preocupações veio a necessidade — se não urgência — de fazer um uso correto e sustentável do solo por meio de práticas agrícolas conscientes e ambientalmente corretas (Melo et al., 2015). Neste sentido, sugerem-se as práticas agrícolas de base orgânica. Salienta-se que esse assunto será amplamente apresentado e discutido no Capítulo III.

O uso de resíduos urbanos e industriais na agricultura pode ser realizada por meio da aplicação do insumo in natura (após estabilização) ou na forma de compostos (após processo de compostagem ou vermicompostagem), trazendo benefícios econômicos e ambientais para toda cadeia produtiva, desde o gerador do resíduo, passando pelo agricultor, até o consumidor final (Pigatin et al., 2015; Landgraf et al., 2005; Ricci, 1996).

A definição do uso de tais insumos dependerá das características do material orgânico selecionado para a produção do insumo agrícola, de forma que este possa apresentar-se como corretivo da acidez do solo, com potencial para condições fertilizantes, além de não promover efeitos deletérios no ambiente etc. Observa-se portanto que estas características variam em função da tecnologia empregada no processamento industrial e no sistema de tratamento de efluentes adotado pela indústria (Santos et al., 2009; Canellas et al., 2001).

Solos com baixo teor de MO e pouco férteis, aliado às práticas culturais inapropriadas e ao alto custo dos fertilizantes, são alguns dos fatores da baixa produtividade da agricultura brasileira. O uso racional de resíduos orgânicos na agricultura, com amparo de legislações agrícolas e ambientais, programas de controle de qualidade e pesquisas pertinentes, poderão contribuir significativamente para o incremento de produtividade e melhoria na qualidade agrícola, além de uma melhor relação custo/benefício (Santos et al., 2009).

Há tempos se estuda a possibilidade da utilização dos resíduos da indústria de couro na agricultura. Esses resíduos são constituídos de materiais orgânicos e sais inorgânicos, sendo que alguns desses componentes são nutrientes importantes para plantas e microrganismos, como N, Ca, S, P, Mg, K e até mesmo o Cr (Cavallet e Selbach, 2008; Selbach et al., 1991).

Entretanto, existem nesses lodos relativas quantidades de elementos químicos que podem ter efeitos deletérios sobre a qualidade do solo e o crescimento das plantas (Araújo et al., 2007).

Alguns trabalhos têm sido publicados na literatura com intuito de divulgar o uso e aplicação dos resíduos de curtume, in natura, na agricultura (Nunes et al., 2016; Cavallet e Selbach, 2008; Alvarez-Bernal et al., 2006; Konrad e Castilhos, 2001, 2002; Barajas-Aceves e Dendooven, 2001; Munn et al., 2000; Selbach et al., 1991).

Os resultados encontrados são diversos. Barajas-Aceves e Dendooven (2001) aplicaram um lodo de curtume contendo Cr em solos de regiões semiáridas do México e observaram aumento na mineralização de C e N. Embora não tenham sido observados efeitos inibitórios no funcionamento biológico do solo, os autores recomendam estudos posteriores para verificar efeitos ambientais de longo prazo.

Alvarez-Bernal et al. (2006) irrigaram, durante 25 anos, solos agrícolas com águas residuais de curtumes contendo diversos elementos, inclusive Cr. Embora não tenham ocorrido impactos desfavoráveis em diversas características do solo e na biomassa microbiana, ocorreu uma inibição da oxidação do NO_2^- , o que indica que o funcionamento biológico do solo poderia ter sido afetado.

Munn, Evans e Chalk (2000), ao aplicarem lodo de esgoto contendo diversos elementos metálicos, entre eles Cr, Pb e Cd nas concentrações de 187,0, 80,0 e 2,5 mg kg⁻¹, respectivamente, detectaram aumento na mineralização e na disponibilidade de N no solo com o aumento da dose de lodo aplicada.

Konrad e Castilhos (2002) observaram que a aplicação de 20,5 mg ha⁻¹ de lodo de curtume em um planossolo elevou o pH de 4,5 para 5,5 e aumentou em seis vezes o teor de Ca do solo, o que implicou em uma melhora na fertilidade e qualidade do solo.

Nos trabalhos citados acima, os resíduos de curtume foram utilizados in natura, adicionados à cobertura como condicionador do solo. Apesar dos bons resultados, este material poderia ser compostado ou vermicompostado, melhorando suas características e parâmetros de fertilidade, além de apresentar uma dinâmica ambientalmente econômica e vantajosa (D'Almeida e Vilhena, 2000; Epstein, 1997).

1.4. Vermicompostagem

De acordo com a NBR 13.591, a compostagem é um processo de decomposição biológica da MO biodegradável de resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas: uma de degradação ativa e outra de maturação (ABNT, 1996).

Este conceito, embora generalista, nada mais é do que o processo que ocorre naturalmente nos ecossistemas. Contudo, a diferença é que lá a MO de origem vegetal e animal é estabilizada em prazo indeterminado, pois depende das condições do meio em que se encontra. Assim, a compostagem pode ser considerada uma técnica que imita os processos naturais, sendo que seu sucesso está atrelado ao controle de requisitos físicos e químicos com vistas à obtenção das condições necessárias ao ótimo desenvolvimento dos processos biológicos (Schalch et al., 2015).

Compostar significa, portanto, reciclar nutrientes através da decomposição da MO de forma mais acelerada e otimizada em relação ao que ocorreria no ambiente (Orrico Júnior et al., 2009).

Uma variante do processo de compostagem é a vermicompostagem, um processo biológico avançado aplicado ao tratamento e ao reaproveitamento de resíduos industriais, agrícolas e urbanos, cuja técnica de decomposição consiste na bio-oxidação e estabilização da MO, resultante da ação combinada de minhocas e da microflora que vive em seu trato digestivo. Além disso, é um método relativamente novo comparado à compostagem (Nunes et al., 2016; Singh et al., 2011).

Na vermicompostagem as minhocas exercem a função de triturar e digerir a MO fresca e, naturalmente, ocasionam uma maturação suplementar do composto orgânico. Segundo Yadav e Garg (2011), os principais processos envolvidos na ação das minhocas sobre a MO são mecânicos e biológicos, representados pelo revolvimento do composto e pela trituração

das partículas orgânicas que passam pelo trato digestivo desses animais, respectivamente. A contribuição do efeito bioquímico está presente desde a decomposição da MO pelos microrganismos existentes no intestino das minhocas, gerando resíduos mais ricos em nutrientes assimiláveis pelas plantas.

Além disso, o corpo da minhoca é constituído de ~ 65% de proteína, 14% de lipídeos, 14% de carboidratos e 3% de cinzas, sendo que ~ 0,01 g de NO_3^- é liberado após a morte de uma minhoca. Para fins de vermicompostagem, as minhocas mais utilizadas são da espécie *Eisenia fetida* e a *Eisenia Andrei* (Nunes et al., 2016; Syriat et al., 2013; Ricci, 1996).

A técnica de vermicompostagem é um processo que envolve dois estágios (Bidone, 2001; Ricci, 1996):

- i. A compostagem, que ocorre até estabilização da temperatura e posterior adição das minhocas. A MO é compostada no formato de pilhas ou leiras, o que ocasiona a redução de possíveis microrganismos patogênicos presentes em esterco animal ou nos resíduos em geral, por exemplo. Nesse estágio, a atividade microbiana é intensa, o que tende a elevar a temperatura no interior do sistema, entre 50 e 60°C.
- ii. O segundo estágio da vermicompostagem inicia-se após o retorno à condição de temperatura ambiente. O material previamente compostado é transferido para vermicompostores, que são caixas, barris, ou canteiros, relativamente rasos. Em seguida, as minhocas são adicionadas na cobertura dos resíduos. O vermicomposto é obtido após um período de aproximadamente 100-135 dias, com um aumento significativo na disponibilidade de macro e micronutrientes e na quantidade de substâncias húmicas (SH) — MO mais estabilizada, melhor discutida no Capítulo II.

Segundo o manual de vermicompostagem da EMBRAPA, em relação à quantidade adequada de minhocas, recomenda-se mil minhocas adultas para cada metro cúbico de resíduo (Ricci, 1996).

O tempo de obtenção do composto ou vermicomposto varia de acordo com as características do material de partida (resíduos frescos). Por exemplo, materiais mais fibrosos, com alto teor de lignina, são mais difíceis de serem degradados e, portanto, requerem maior tempo de vermicompostagem. Segundo Yadav e Garg (2011), a compostagem é uma tecnologia lenta e delicada, que envolve diversos processos de transformação e decomposição da MO. Além disso, relaciona-se à essas transformações a intrínseca combinação de materiais (resíduos frescos), além da humidade, temperatura e microrganismo, podendo levar meses, ou até anos. Dessa forma, o uso das minhocas (vermicompostagem) acelera o processo de degradação dos compostos orgânicos, apressa e agiliza o ciclo do carbono, reduzindo substancialmente o tempo de percurso entre a fotossíntese e o húmus (Lourenço, 2014; Yadav e Garg, 2011; Adani et al., 1999; Ricci, 1996).

Ademais, é importante que o local destinado à vermicompostagem seja bem aerado, sombreado e com boa drenagem. A humidade ideal é de ~ 40%. Uma forma prática de avaliar se a humidade está ideal é pegando um pouco de material e apertando-o na mão; a água não deve escorrer, ficando a mão apenas úmida (Pigatin et al., 2015; Landgraf et al., 2005; Ricci, 1996).

Para saber a proporção dos resíduos frescos (esterco, serragem e outros compostos orgânicos) deve-se partir da relação C:N (razão elementar dos teores de carbono e nitrogênio) das misturas, a qual deve estar em torno de 20-30. A diminuição da relação C:N em função do tempo de vermicompostagem indica o aumento da degradação da MO, o que está diretamente relacionado à qualidade e maturidade do vermicomposto. A relação C:N infere sobre o grau de incorporação do nitrogênio à estrutura húmica. Segundo Landgraf, Messias e Rezende (2005) a incorporação de N proporciona o aumento da fertilidade desse material, pois o N é liberado para as raízes das plantas sob forma de nitrato por meio de diversos mecanismos de mineralização da MO (Lourenço, 2014; Yadav e Garg, 2011; Adani et al., 1999; Ricci, 1996).

Uma relação C:N em torno de 10 é considerada ideal para o vermicomposto final. Tais valores indicam baixa atividade microbiana e possível estabilização do material (Provenzano et al., 2001; Bernai et al., 1998; Chefetz et al., 1996).

A prática de vermicompostagem pode ser aplicada na reciclagem de resíduos orgânicos urbanos e agroindustriais. O húmus, produto final deste processo, é um insumo de alta qualidade para ser utilizado como condicionador de solos.

Diversos resíduos industriais já foram vermicompostados, incluindo lodo da indústria têxtil (Kaushik e Garg, 2003), resíduos da produção de açúcar (Sen e Chandra, 2007), da indústria de papel e celulose (Kaur et al., 2010) etc.

No que se refere aos resíduos da indústria de couro, Ravindran et al. (2008) e Vig et al. (2011) avaliaram a vermicompostagem de lodo de curtume e concluíram que é possível produzir húmus a partir desse passivo ambiental.

Vale ressaltar que, desde sempre, os trabalhos encontrados na literatura sobre vermicompostagem se restringem principalmente a revistas e periódicos da área de agronomia ou demais ciências agrárias. Um dos focos deste trabalho foi aprofundar o estudo químico, espectroscópico e agrônomo por detrás da dinâmica da vermicompostagem de resíduos orgânicos industriais, indicando o caminho, fenômenos e processos ocorridos ao longo da valorização da MO, sob a luz da química, ambiental e analítica.

2. OBJETIVOS DO CAPÍTULO I

Este trabalho teve como objetivo aplicar a vermicompostagem como forma de valorização da matéria orgânica dos resíduos de curtume. Por meio da vermicompostagem, espera-se tratar e reaproveitar os resíduos obtidos na produção industrial do couro para a produção de insumo agrícola para uso em práticas de agricultura orgânica ou de base ecológica.

Como objetivos específicos propõem-se:

- a.* Caracterizar os resíduos frescos utilizados na vermicompostagem: esterco, serragem e os resíduos de curtume (raspas e aparas curtidas de couro wet-blue e o lodo da estação de tratamento);
 - b.* Vermicompostar os resíduos frescos caracterizados, adicionando esterco bovino e serragem para ajuste de uma relação C:N entre 20 e 30;
 - c.* Caracterizar, monitorar e avaliar os atributos de fertilidade (pH, MO, TOC, CTC etc.) ao longo do processo de vermicompostagem e, também, do vermicomposto produzido;
 - d.* Caracterizar e monitorar a dinâmica do cromo durante a vermicompostagem: concentração de Cr total, Cr (III) e Cr (VI), além da conversão (redução) do Cr (VI) a Cr (III) durante o processo.
-

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Resíduos Frescos

Os resíduos frescos utilizados foram:

Resíduos principais (objeto principal deste estudo):

- i.* Lodo da estação de tratamento de efluentes;
- ii.* Raspas e aparas curtidas de couro wet-blue;

Resíduos secundários (substrato orgânico):

- iii.* Esterco bovino e
- iv.* Serragem.

3.1.1. Resíduos de curtume

Os resíduos principais (Figura 6 — I) foram obtidos no curtume e empresa DALUVA Comércio e Acabamento de Couros LTDA, localizada no município de Bocaina (SP).

As aparas e raspas de couro wet-blue (Figura 6.a — I) foram obtidas no processo de acabamento (etapas de recorte, lixamento e desempoamento). Após a coleta, o material foi armazenado em caixas e, para produção do vermicomposto, o resíduo foi utilizado sem tratamento prévio, conforme coletado no curtume.

O lodo proveniente da estação de tratamento de efluentes foi obtido na etapa de acabamento (tingimento, enxágue e cavalete). O material foi coletado nos tanques de tratamento e era rígido na forma de tabletes (Figura 6.b — I). Após serem secos ao ar, os tabletes foram triturados em moinho de facas, obtendo-se assim um material granulado fino (Figura 6.c — I).

Figura 6 — I. Resíduos de curtume utilizados no preparo dos vermicompostos; a. Raspas e aparas curtidas de couro wet-blue; b'. Lodo da estação de tratamento de efluentes, antes do processamento mecânico; b''. Lodo da estação de efluentes de resíduos, após o processamento mecânico.

3.1.2. Esterco bovino

O esterco bovino foi adicionado ao substrato orgânico (SO) como o seu principal componente — ~ 70% do volume total dos resíduos frescos — e foi essencial para o decurso de vida da biota (minhocas) e microbiota (micro-organismos) que coabitaram o interior dos vermicompostores.

Foram coletadas amostras frescas de estrume em curral fechado (gado de confinamento), na Fazenda Invernada, no município de São Carlos (SP). O material foi lavado exaustivamente e seco ao ar para obtenção do esterco seco e livre de ácido úrico.

3.1.3. Serragem

Foram coletadas amostras de serragem de eucalipto *Eucalyptus globulus* na serraria da empresa Móveis Souza, localizada na cidade de Descalvado (SP). Para produção do vermicomposto, o resíduo foi utilizado sem tratamento prévio, conforme coletado.

A serragem foi um elemento estruturante na construção do SO e do vermicompostor. Favoreceu a aeração e, consequentemente, o fornecimento de oxigênio e ar aos organismos e micro-organismos presentes na cultura.

3.2. Caracterização dos resíduos frescos

O Anexo 1 (M1 — Metodologias para Análises Químicas) apresenta as metodologias adotadas nas análises de caracterização dos resíduos frescos. Os parâmetros estudados foram:

- i. Sólidos totais (ST)
- ii. pH
- iii. Carbono orgânico total (TOC)
- iv. Matéria orgânica (MO)
- v. Análise elementar (CHN-O)
- vi. Relação C:N
- vii. Capacidade de troca catiônica (CTC)
- vii.i. Acidez trocável (A)
- vii.ii. Bases trocáveis (B)
- vii.iii. Saturação por bases (%V)

Em adição a estas caracterizações, analisou-se o conteúdo de Cr dos resíduos frescos: Cr total, Cr (III) e Cr (VI). O Anexo 2 (M2 — Metodologias para Determinação de Cr) apresenta os procedimentos adotados nessas determinações.

3.3. Montagem dos experimentos — Vermicompostores

Os vermicompostores (Figura 7 — I) foram construídos em recipientes adequados utilizando diferentes proporções dos resíduos frescos (baseado em volume seco). A proporção entre os substratos foi determinada pela relação C:N desta combinação. Os recipientes utilizados foram tambores plásticos com capacidade de 25,0 L, aos quais foram adicionados 20,0 L da mistura dos resíduos. Em adição, construiu-se um vermicompostor controle, o qual recebeu apenas o SO (esterco bovino e serragem).

Figura 7 — I. Vermicompostores construídos para realização dos experimentos de vermicompostagem.

FONTE: Autoria própria.

A adição dos resíduos ao vermicompostor deu-se em patamares, com a formação de horizontes (Figura 8 — I). Efetuadas as misturas, o material permaneceu em repouso durante 1 semana. Em seguida, todo o conteúdo foi revirado manualmente. Foram construídas três réplicas de cada tratamento, a saber:

- i. VRC—L: vermicompostagem do lodo da estação de tratamento + SO;
- ii. VRC—A: vermicompostagem das aparas e raspas curtidas + SO;
- iii. VRC—AL: vermicompostagem da mistura de aparas e raspas curtidas e o lodo da estação de tratamento + SO; e
- iv. VRC—STD: vermicompostagem do SO, sem adição dos resíduos de curtume.

Para produção do vermicomposto, 500 minhocas da espécie californiana (*Eisenia fetida*) foram inoculadas em cada vermicompostor. As minhocas foram obtidas em criatórios próprios (minhocários), e foram fornecidas pela empresa Sobloco Desenvolvimento Urbano S/A, localizada no município de São Carlos (SP).

Na cobertura dos vermicompostores foi adicionada uma camada de folhas secas, as quais tiveram a função de favorecer a ambientação das minhocas e evitar o contato direto do sol na superfície do vermicompostor. Por último, os vermicompostores foram cobertos com uma tela de nylon para impedir a entrada de outros animais, preservando o sistema.

Para favorecer a aeração e o fornecimento de O_2 às minhocas e aos micro-organismos, os vermicompostores foram revolvidos semanalmente. Nos 2 primeiros meses fez-se manualmente, nos demais utilizou-se de uma pá.

Os vermicompostores foram mantidos na área externa do Laboratório de Química Ambiental (LQA), localizado no Instituto de Química de São Carlos (IQSC), Universidade de São Paulo (USP).

Folhas secas (5,0 cm)
Esterco (3,00 L)
VRC—L: Lodo (1,00 L)
VRC—A: Aparas curtidas (1,00 L)
VRC—AL: Lodo (0,25 L) + Aparas curtidas (0,75 L)
Serragem (0,50 L)
Esterco (2,00 L)
VRC—L: Lodo (1,00 L)
VRC—A: Aparas curtidas (1,00 L)
VRC—AL: Lodo (0,25 L) + Aparas curtidas (0,75 L)
Serragem (0,50 L)
Esterco (2,00 L)
VRC—L: Lodo (1,00 L)
VRC—A: Aparas curtidas (1,00 L)
VRC—AL: Lodo (0,25 L) + Aparas curtidas (0,75 L)
Esterco (2,00 L)
Serragem (0,50 L)
Esterco (2,00 L)
VRC—L: Lodo (1,00 L)
VRC—A: Aparas curtidas (1,00 L)
VRC—AL: Lodo (0,25 L) + Aparas curtidas (0,75 L)
Esterco (2,00 L)
Serragem (0,50 L)
Esterco (2,00 L)

Figura 8 — I. Horizontes dos resíduos frescos utilizados na construção dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL). Para a construção dos vermicompostores VRC—STD foram omitidos os horizontes contendo os resíduos de curtume.

FONTE: Autoria própria.

3.4. Monitoramento da vermicompostagem

Entende-se como monitoramento da vermicompostagem o acompanhamento da evolução dos parâmetros químicos e físicos, não espectroscópicos, ocorridos na transformação dos resíduos frescos em vermicompostos. Foram realizados três tipos de monitoramento:

- i. Monitoramento das minhocas: referente ao monitoramento do tamanho e peso das minhocas *E. fetida* ao longo da vermicompostagem;
- ii. Monitoramento químico: referente ao monitoramento dos principais parâmetros químicos que evidenciam a ocorrência da vermicompostagem; e
- iii. Monitoramento do cromo: referente ao controle dos teores do cromo durante a vermicompostagem — Cr total e seus estados disponíveis, Cr (III) e Cr (VI).

3.4.1. Monitoramento das minhocas *E. fetida*

Minhocas são essenciais para que a vermicompostagem ocorra. Sendo assim, é mandatório conhecer os possíveis efeitos nocivos dos resíduos a estes organismos. Fez-se isso analisando sua adaptação ao meio via seus índices biométricos, a saber:

- i. Ganho percentual de massa (%WPG): Três grupos de cinco minhocas foram recolhidos em cada vermicompostor e lavados com água corrente. Em seguida, os organismos foram secos em papel absorvente e pesados. O peso anotado foi dividido por cinco (minimizando erros estatísticos) e a média calculada. O %WPG foi calculado comparando o peso das minhocas em um determinado tempo em comparação ao tempo zero, quando as minhocas foram adicionadas. As coletas foram realizadas nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias. As minhocas usadas para calcular o %WPG foram devolvidas ao seu respectivo vermicompostor.
- ii. Ganho percentual de tamanho (%LPG): Cinco minhocas foram coletadas em cada vermicompostor e asfixiadas com etanol. Em seguida, os organismos foram secos ao ar e tiveram seu tamanho (comprimento) anotado. O %LPG foi calculado comparando o comprimento médias das minhocas em um determinado tempo em comparação ao tempo zero. As coletas foram realizadas nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias. Os organismos foram macerados e guardados para determinações futuras dos teores de Cr (III) e Cr (VI).

Em adição, criou-se um diário de eventos. Semanalmente os vermicompostores eram analisados criteriosamente e tiveram suas observações anotadas. Tomaram-se notas do tipo:

- i. Desenvolvimento do clitelo nas minhocas;
- ii. Presença de casulos;
- iii. Presença de filhotes;
- iv. Fuga;
- v. Óbitos de minhocas etc.

3.4.2. Monitoramento químico

Para realização deste monitoramento, 2,0 L de material foram coletados em cada vermicompostor nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias. O material obtido foi macerado e tamizado a 2,0 mm e, em seguida, foi conservado em sacos plásticos. A partir de cada triplicata, foram misturados 50,0 g de cada réplica, constituindo uma amostra composta. Este material foi levado à estufa à $(100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ até peso constante.

O Anexo 1 (M1 — Metodologias para Análises Químicas) apresenta as metodologias adotadas no monitoramento da vermicompostagem. Os parâmetros estudados foram:

- i.* Sólidos totais (ST)
- ii.* pH
- iii.* Carbono orgânico total (TOC)
- iv.* Matéria orgânica (MO)
- v.* Análise elementar (CHN-O)
- vi.* Relação C:N
- vii.* Capacidade de troca catiônica (CTC)
- vii.i.* Acidez trocável (A)
- vii.ii.* Bases trocáveis (B)
- vii.iii.* Saturação por bases (%V)

Além destes parâmetros, três vezes por semana (segundas, quartas e sextas-feiras) foram monitorados os parâmetros: humidade e temperatura. As determinações foram feitas entre 6 e 9 horas da manhã, utilizando-se um sensor de temperatura e humidade. A temperatura foi medida em 3 alturas diferentes: ponto baixo (L), médio (M) e alto (H), distribuídos verticalmente ao longo do vermicompostor. A humidade foi medida no centro da superfície do vermicompostor. Caso necessário, foi adicionado água para ajuste da humidade para ~ 40%.

3.4.3. Monitoramento do Cr

Além das análises químicas acima citadas, monitoraram-se os teores de Cr ao longo da vermicompostagem: Cr total, Cr (III) e Cr (VI). Ademais, a bioconversão (redução) do Cr (VI) em Cr (III) foi verificada. O Anexo 2 (M2 — Metodologias para Determinação de Cr) apresenta os procedimentos adotados nessas determinações.

3.5. Análise e testes estatísticos dos dados

Todas as análises, testes e ensaios foram realizados em triplicata e os resultados apresentados em média $\pm$ desvio padrão (DP). Os testes estatísticos de significância foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguido de teste de Duncan para comparação entre as médias dos tratamentos ($P < 0,05$ e $n-1$ graus de liberdade).

Os testes e análises estatísticas foram realizados no programa SPSS Statistics, desenvolvido pela IBM.

As curvas analíticas, quando aplicáveis, foram feitas no software OriginPro versão 9.1, e tiveram os seguintes parâmetros determinados: equação da reta, coeficiente de determinação (R^2), limite de detecção (LOD) e limite de quantificação (LOQ). O Anexo 3 (M3 — Validação de metodologia analítica) apresenta os procedimentos adotados para o cálculo e determinações destes parâmetros.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização dos resíduos frescos

Os resultados obtidos sugerem que os resíduos frescos são quimicamente muito diferentes entre eles, com variações significativas entre um resíduo e outro (ANOVA One-way, $P < 0,05$) (Tabela 3 – I).

A principal diferença — e motivo de preocupação — foram os valores de pH observados nas aparas² (3,31) e na serragem (4,84). Por serem muito baixos, estes pH poderiam interferir no processo de vermicompostagem, não permitindo que as minhocas se adaptassem ao meio.

Os teores de MO e TOC foram diretamente proporcionais, sendo determinados em maior concentração na serragem (MO 99,11% e TOC 57,69%) e nas aparas (MO 94,96% e TOC 48,26%), seguidos pelo esterco (MO 63,02% e TOC 34,30%) e pelo lodo (MO 36,62% e TOC 17,20%).

O resíduo com maior CTC foi o lodo (904,39 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), provavelmente devido à quantidade elevada de produtos químicos, ricos em metais, provenientes do tratamento ao qual os efluentes foram submetidos.

A análise elementar foi mandatória para o cálculo da relação C:N. Os valores mais relevantes são os das amostras de esterco (12,40) e de serragem (107,04). Por constituir o SO, estes resíduos foram adicionados aos vermicompostores em maior quantidade, sendo eles os responsáveis pelo ajuste da relação C:N das misturas, com valores entre 20-30 e que, para o êxito do processo, devem diminuir ao longo da vermicompostagem. Estatisticamente, o lodo e as aparas apresentaram relações C:N estatisticamente iguais: 5,04 e 2,76, respectivamente (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Tabela 3 — I. Características químicas dos resíduos frescos: resíduos de curtume (lodo e aparas), esterco e serragem (média $\pm$ DP, $n = 3$, cálculos com base em peso seco).

	Lodo	Aparas	Esterco	Serragem
ST %	90,45 $\pm$ 2,10b	76,97 $\pm$ 0,81a	89,20 $\pm$ 9,22b	88,71 $\pm$ 4,04b
pH	7,83 $\pm$ 0,03d	3,31 $\pm$ 0,01a	8,88 $\pm$ 0,03c	4,84 $\pm$ 0,01b
MO %	36,62 $\pm$ 1,51a	94,96 $\pm$ 1,34c	63,02 $\pm$ 0,72b	99,11 $\pm$ 0,20d
TOC %	17,20 $\pm$ 1,43a	48,26 $\pm$ 0,25c	34,30 $\pm$ 1,17b	57,69 $\pm$ 2,49d
CTC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	904,39 $\pm$ 28,65c	105,05 $\pm$ 6,95a	260,66 $\pm$ 9,96b	113,90 $\pm$ 7,66a
Análise Elementar				
C %	23,37 $\pm$ 0,08a	36,81 $\pm$ 0,12b	25,06 $\pm$ 0,11a	46,03 $\pm$ 0,12c
H %	4,19 $\pm$ 0,07b	5,93 $\pm$ 0,05c	3,58 $\pm$ 0,11a	5,37 $\pm$ 0,05c
N %	4,63 $\pm$ 0,06c	13,30 $\pm$ 0,08d	2,02 $\pm$ 0,02b	0,43 $\pm$ 0,06a
O %	66,40 $\pm$ 0,28c	42,22 $\pm$ 0,17a	68,78 $\pm$ 0,26cd	47,82 $\pm$ 0,16ab
Relação C:N	5,04 $\pm$ 0,10a	2,76 $\pm$ 0,14a	12,40 $\pm$ 0,11b	107,04 $\pm$ 0,13c

Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: ST Sólidos totais; MO Matéria orgânica; TOC Carbono orgânico total; CTC Capacidade de troca catiônica.

² A amostra 'Aparas' simplifica o uso o do termo 'Raspas e aparas curtidas de couro wet-blue'. Embora pareça um termo genérico, resumi-lo facilitará a compreensão dos resultados e sua discussão.

Além dos atributos de fertilidade, os resíduos foram caracterizados quanto aos teores de Cr. Os resultados sugerem que os resíduos principais apresentaram um teor maior de Cr (III) — lodo 11,27 e aparas 11,41 mg kg⁻¹ — e menor de Cr (VI), conforme o esperado — lodo 4,37 e aparas 5,32 mg kg⁻¹. Para os resíduos que compõem o SO (esterco e serragem), as concentrações de Cr foram determinadas abaixo do LOQ (79,80 µg kg⁻¹) (Tabela 4 — I).

Quanto aos teores de Cr total, a maior concentração foi determinada nas aparas 54,90 mg kg⁻¹ seguida pelo lodo, 40,12 mg kg⁻¹. Ambas as concentrações são estatisticamente diferentes. O Cr total foi aberto em micro-ondas (MAE) e é o somatório de todo o Cr presente na amostra, disponível (extraível em solução aquosa) ou não. Os valores de Cr (III) e Cr (VI) são estatisticamente iguais na comparação entre os resíduos de curtume (ANOVA One-way, P < 0,05).

Tabela 4 — I. Teor de Cr total e Cr disponível — Cr (III) e Cr (VI) — obtidos na caracterização dos resíduos frescos: resíduos de curtume (lodo e aparas), esterco e serragem.

	Lodo	Aparas	Esterco	Serragem
Cr total mg kg ⁻¹	40,12 ± 0,99a	54,90 ± 2,57b	< LOQ	< LOQ
Cr disponível				
Cr (III) mg kg ⁻¹	11,27 ± 1,53a	11,41 ± 0,24a	< LOQ	< LOQ
Cr (VI) mg kg ⁻¹	4,37 ± 0,10a	5,32 ± 1,68a	< LOQ	< LOQ

Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em P < 0,05 de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

4.2. Monitoramento das minhocas *E. fetida*

De acordo com os índices biométricos monitorados, considera-se que é possível o uso de minhocas *E. fetida* na vermicompostagem dos resíduos de curtume nas condições aplicadas neste estudo.

Em geral, notou-se um ganho de massa e tamanho em todas as minhocas que receberam resíduos de curtume em seus tratamentos (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) (Figura 9 — I). Os itens a seguir descrevem melhor esse comportamento. A cada 15 dias, ao revirar as amostras, tomou-se nota das principais observações relativas ao comportamento e ambientação das minhocas (Figura 10.a — I). As seguintes observações foram realizadas:

- i. Início da contagem do tempo de vermicompostagem: Adicionaram-se as minhocas *E. fetida* na cobertura dos vermicompostores. Sobre elas foi adicionada uma camada de 5 cm de folhas secas.
- ii. 3° Dia: As minhocas deixaram a cobertura dos vermicompostores, penetrando o interior dos resíduos frescos.
- iii. 15° Dia: Dispersão das minhocas na camada superior do vermicompostor (até 10 cm a partir da cobertura). Algumas aglomerações de minhocas ainda eram observadas.
- iv. 30° Dia: Dispersão das minhocas por todo o vermicompostor, com notável ganho de massa e tamanho. Primeira observação do clitelo em minhocas da amostra VRC—AL (Figura 10.b — I).
- v. 45° Dia: Observação dos primeiros casulos nos vermicompostores VRC—AL2 e VRC—AL3. Desenvolvimento do clitelo em minhocas dos demais vermicompostores, com exceção das amostras VRC—L1 e VRC—STD.
- vi. 60° Dia: Observação de casulos em todos os vermicompostores, com exceção do controle (VRC—STD). Nas réplicas dos vermicompostores VRC-AL foram observados os primeiros filhotes.
- vii. 95° Dia: Primeiro relato de fuga — algumas minhocas foram encontradas ao lado de fora do experimento, entre os vermicompostores VRC—L1 e VRC—L2. A fuga provavelmente ocorreu entre os furos pelos quais faziam-se

as medições da temperatura. Provavelmente deveu-se à falta de alimento, uma vez que o experimento já se estendia por mais de 3 meses.

- viii. 105° Dia: Uma quantidade maior de minhocas foi encontrada do lado de fora dos vermicompostores. Boa parte delas estavam mortas (Figura 10.c — I). Nesse período ocorreram chuvas torrenciais.
- ix. 120° Dia: Algumas minhocas subnutridas foram observadas em quase todos os vermicompostores, além de uma pequena quantidade óbitos registrados. Observou-se o surgimento do clitelo nas minhocas do vermicompostor controle (VRC—STD).
- x. 135° Dia: Grande quantidade de minhocas mortas. Optou-se por interromper o experimento em função do tempo e dos atributos químicos monitorados, os quais apresentavam valores otimizados. Até o final dos 135 dias não foram observados sinais de reprodução na amostra VRC—STD, casulos ou filhotes.

Figura 9 — I. Desenvolvimento típico das minhocas *E. fetida* durante a vermicompostagem de uma amostra (VRC—L1) nos tempos 0, 30, 90 e 135 dias.

FONTE: Autoria própria.

a.

b.

c.

Figura 10 — I. Histórico de eventos ocorridos durante a vermicompostagem. Estes registros se referem as observações das minhocas *E. fetida* ao longo do processo; a. Coleta quinzenal de amostra e revolvimento do material durante a vermicompostagem; b. Surgimento do clitelo nas minhocas *E. fetida* aos 30 dias de vermicompostagem (vermicompostores e amostras VRC—AL1 e VRC—AL2; c. Primeiros organismos mortos encontrados ao lado de fora dos experimentos, entre os vermicompostores VRC—L1 e VRC—L2.

FONTE: Autoria própria.

4.2.1. Ganho percentual de massa (%WPG)

De acordo com os resultados apresentados, as minhocas que se desenvolveram em tratamentos com adição dos resíduos de curtume apresentaram um ganho de massa superior à amostra controle (Tabela 5 — I e Figura 11 — I). Destaque para a amostra VRC—AL, a qual apresentou o maior %WPG na comparação entre os tempos 0 e 135 dias, seguida pelos demais tratamentos: VRC—AL (433,57%) > VRC—A (370,19%) > VRC—L (233,71%) > VRC—STD (40,26%); todos estatisticamente diferentes (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

As minhocas da amostra VRC—STD apresentaram um desenvolvimento inferior ao determinado nas demais amostras. Analisando seu %WPG, foi observado um ganho de massa até os primeiros 30 dias de vermicompostagem (80,25%). Em seguida, este valor decresceu até os 60 dias (retornando para 40,40%), permanecendo com valores estatisticamente iguais até o final da vermicompostagem (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Em geral, as amostras contendo resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL) tenderam a aumentar seu %WPG quinzenalmente com valores estatisticamente diferentes. Porém, essa tendência não foi observada na amostra VRC—STD (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

4.2.2. Ganho percentual de tamanho (%LPG)

As minhocas *E. fetida*, em todos os vermicompostores, apresentaram um aumento de comprimento (tamanho) até os 30 dias de experimento (Tabela 6 — I e Figura 12 — I). Após essa data, as amostras VRC—AL e VRC—A diminuíram seu %LPG. Aos 45 dias, as amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL voltaram a apresentar um ganho percentual de tamanho. Esta tendência foi observada novamente em todas as coletas, periodicamente. Novamente, destaca-se os resultados obtidos para a amostra VRC—AL, na qual foi observado o maior aumento em seu %LPG entre os tempos 0 e 135 dias, seguida pelos demais tratamentos: VRC—AL (100,92%) > VRC—A (73,06%) > VRC—L (46,94%) > VRC—STD (24,18%); todos estatisticamente diferentes (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Diferentemente do observado na análise do %WPG, as tendências de aumento e diminuição do %LPG foram aleatórias em todas as amostras, fazendo com que os valores de %LPG apresentassem suas significâncias estatísticas variando indiferentemente do tempo de análise para uma mesma amostra (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Tabela 5 — I. Ganho percentual de massa (%WPG) das minhocas *E. fetida* durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD) (média $\pm$ DP, n = 3). Unidades em %.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	0,00 $\pm$ 0,00a	0,00 $\pm$ 0,00a	0,00 $\pm$ 0,00a	0,00 $\pm$ 0,00a
15 Dias	77,36 $\pm$ 11,90b	140,31 $\pm$ 7,81b	152,21 $\pm$ 8,60b	42,00 $\pm$ 11,63bc
30 Dias	165,19 $\pm$ 9,19c	224,59 $\pm$ 3,67c	252,74 $\pm$ 4,53c	80,25 $\pm$ 3,41d
45 Dias	201,14 $\pm$ 7,05d	267,84 $\pm$ 7,84d	291,45 $\pm$ 8,12d	56,59 $\pm$ 5,47c
60 Dias	231,43 $\pm$ 8,86f	319,18 $\pm$ 7,84e	340,50 $\pm$ 4,08e	40,40 $\pm$ 5,28b
90 Dias	203,67 $\pm$ 6,68d	312,33 $\pm$ 12,78e	356,46 $\pm$ 8,77ef	49,40 $\pm$ 12,92c
135 Dias	223,71 $\pm$ 5,27Bef	370,19 $\pm$ 8,10Cf	433,57 $\pm$ 10,68Dg	40,26 $\pm$ 22,31Abc

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 11 — I. Ganho percentual de massa (%WPG) das minhocas *E. fetida* durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD), nos tempos 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias.

Tabela 6 — I. Ganho percentual de tamanho (%LPG) das minhocas *E. fetida* durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD) (média ± DP, n = 3). Unidades em %.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	0,00 ± 0,00a	0,00 ± 0,00a	0,00 ± 0,00a	0,00 ± 0,00ab
15 Dias	28,68 ± 4,10bc	44,01 ± 5,68b	52,77 ± 5,14b	4,45 ± 11,94ab
30 Dias	45,01 ± 8,87d	71,45 ± 5,47d	89,69 ± 5,00d	29,16 ± 9,62c
45 Dias	46,64 ± 6,13d	57,17 ± 5,12c	65,49 ± 10,10c	26,78 ± 10,58c
60 Dias	53,53 ± 10,36de	83,29 ± 8,33de	78,63 ± 7,32d	-4,96 ± 9,53a
90 Dias	16,83 ± 12,29b	55,45 ± 9,57bc	52,99 ± 6,56b	-1,50 ± 6,24ab
135 Dias	46,94 ± 13,37Bd	73,06 ± 15,61Cd	100,92 ± 19,59De	24,18 ± 8,65Ac

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.
LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 12 — I. Ganho percentual de tamanho (%LPG) das minhocas *E. fetida* durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume — lodo e aparas curtidas (amostras VRC—L, VRC—A E VRC—AL) — e amostra controle (VRC—STD), nos tempos 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias.

4.3. Monitoramento da vermicompostagem

O processo de vermicompostagem foi monitorado por meio dos seguintes parâmetros e atributos de fertilidade: temperatura, ST, pH, MO, TOC, CTC, relação C:N, e outros a esses relacionados (A, B, V%, C e N). Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos.

4.3.1. Temperatura

As variações da temperatura foram apresentadas em três gráficos, cada qual para uma altura do vermicompostor: ponto alto (H) (Figura 13.a – I), ponto médio (M) (Figura 13.b – I), ponto baixo (L) (Figura 13.c – I), e também, a temperatura ambiente no momento das medições.

Com o tempo, a ação detritiva das minhocas tendeu a compactar o material, diminuindo assim o seu volume. Cada ponto (H, M e L) teve sua temperatura medida até uma determinada data, a qual foi determinada pelo volume necessário para determinação de T.

Após 12 de junho (~ 2 meses de vermicompostagem) o volume de material no ponto H não era suficiente para perfuração da sonda que registrava a temperatura ($T_{\text{ambiente}} = T_{\text{do vermicompostor no ponto H}}$). O mesmo ocorreu em 5 de agosto para o ponto M (~ 4 meses de vermicompostagem).

A temperatura ambiente oscilou em função das condições climáticas. Durante os 135 dias de vermicompostagem ocorreram 3 semanas com períodos de chuvas torrenciais: em 10 de junho, 5 de julho e 14 de agosto. Nessas datas foram observadas uma diminuição na T_{ambiente} .

Em geral, os vermicompostores contendo os resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL) não apresentaram diferença nas variações de suas temperaturas. Quase sempre os gráficos se sobrepõem.

A amostra VRC—L apresentou, em algumas datas, uma temperatura abaixo dos demais vermicompostores (amostras VRC—A e VRC—AL). No ponto M em 26 de junho e entre os dias 26-31 de julho, estas variações não ultrapassaram 1,5°C. No ponto L esta diminuição ocorreu após o dia 14 de agosto, seguindo-se até o final da vermicompostagem.

O vermicompostor controle (VRC—STD) apresentou comportamentos distintos em cada ponto medido. No ponto H a temperatura permaneceu abaixo da temperatura observada nas amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL, com exceção às datas 24 de abril, 15 de maio e 24 de maio. Por serem pontos isolados, essas determinações podem conter erros experimentais. No ponto L, após a data de 26 de junho, a temperatura de VRC—STD permaneceu abaixo dos resultados observados nos demais tratamentos.

As variações de temperatura podem estar relacionadas à ação detritívora dos micro-organismos presentes no trato digestivo das minhocas *E. fetida* no ato de sua alimentação, processo que é exotérmico. Além disso, esperava-se que a mistura de resíduos tivesse a capacidade de reter calor, estabilizando a temperatura, fazendo com que T nos vermicompostores não oscile tal qual ocorreu em T_{ambiente} , conforme o observado (Pigatin et al., 2015; Ricci, 1996).

Figura 13.a — I. Monitoramento da temperatura no ponto alto (H) dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A, VRC—AL e VRC—STD) e, também, a variação da temperatura ambiente, durante o processo de vermicompostagem. Medições entre os dias 10 de abril e 12 de junho de 2013.

Figura 13.b — I. Monitoramento da temperatura no ponto médio (M) dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A, VRC—AL e VRC—STD) e, também, a variação da temperatura ambiente, durante o processo de vermicompostagem. Medições entre os dias 10 de abril e 5 de agosto de 2013.

Figura 13.c — I. Monitoramento da temperatura no ponto baixo (L) dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A, VRC—AL e VRC—STD) e, também, a variação da temperatura ambiente, durante o processo de vermicompostagem. Medições entre os dias 10 de abril e 26 de agosto de 2013.

Figura 13 — I. Monitoramento da temperatura dos vermicompostores (amostras VRC—L, VRC—A, VRC—AL e VRC—STD) e, também, a variação da temperatura ambiente, durante o processo de vermicompostagem.

4.3.2. Sólidos totais (ST)

Analisando os resultados de ST, os valores obtidos não apresentaram uma lógica ou tendência de aumento ou de diminuição ao longo da vermicompostagem (Tabela 7 — I e Figura 14 — I). Em geral, os valores de ST sofrem influência direta da humidade e outros fatores externos, já que a experimentação foi realizada em condições naturais e reais. Contudo, as amostras VRC—A, VRC—AL apresentaram a mesma tendência ao longo do processo, com valores estatisticamente iguais, ST 52,03 e 53,86%, respectivamente, após 135 dias de vermicompostagem. O mesmo ocorreu com as amostras VRC—L e VRC—STD, que apresentaram vermicompostos com valores estatisticamente iguais de ST, 49,02 e 47,16% (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Os valores obtidos sugerem que os resíduos de curtume possuem composições químicas distintas, no que se refere aos compostos responsáveis pela sorção de compostos voláteis e água, principalmente. Já a amostra controle (VRC—STD) apresentou uma tendência diferente das amostras VRC—A e VRC—AL, indicando uma estruturação diversa dos grupos disponíveis para retenção de humidade e outros componentes voláteis.

Os valores de ST não são atributos importantes em termos do monitoramento da vermicompostagem, pois não inferem sobre a qualidade e fertilidade de um composto orgânico, se limitando a humidade dos compostos, que deve ser de ~ 40% m/m (Pigatin et al., 2015; Ricci, 1996).

Tabela 7 — I. Monitoramento dos sólidos totais (ST) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, $n = 3$, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	50,24 $\pm$ 0,14bc	51,58 $\pm$ 0,46cd	55,35 $\pm$ 0,17d	52,39 $\pm$ 2,65d
15 Dias	59,02 $\pm$ 0,78d	60,51 $\pm$ 1,21e	60,96 $\pm$ 1,34e	52,49 $\pm$ 0,31d
30 Dias	50,41 $\pm$ 1,01bc	47,21 $\pm$ 0,17c	50,90 $\pm$ 0,69ab	41,91 $\pm$ 0,03a
45 Dias	51,49 $\pm$ 0,88c	50,52 $\pm$ 0,95cd	52,35 $\pm$ 0,28bc	48,54 $\pm$ 0,63bc
60 Dias	45,52 $\pm$ 1,32a	43,01 $\pm$ 0,23a	48,28 $\pm$ 1,16a	47,47 $\pm$ 0,17b
90 Dias	45,25 $\pm$ 0,39a	44,65 $\pm$ 0,50ab	50,21 $\pm$ 0,50ab	55,65 $\pm$ 0,19de
135 Dias	49,02 $\pm$ 0,89ABb	52,03 $\pm$ 1,97Cd	53,86 $\pm$ 2,85Ccd	47,16 $\pm$ 0,38Ab

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 14 — I. Monitoramento dos sólidos totais durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

4.3.3. pH

Analisando os valores de pH obtidos (Tabela 8 — I e Figura 15 — I), com exceção da amostra VRC—STD, todos os tratamentos apresentaram uma tendência de diminuição em seus valores de pH. No momento em que se adicionaram as minhocas (tempo = 0 dias), todos os pHs foram determinados entre 8,46-8,67. Aos 135 dias, os vermicompostos apresentaram valores entre 7,67-8,57. As maiores reduções ocorreram nas amostras VRC—AL, seguida pelas demais amostras contendo resíduos de curtume e, em seguida, a amostra controle: VRC—AL (0,79 unidades de pH) > VRC—A (0,59) > VRC—L (0,35) > VRC—STD (0,08).

Aos 135 dias, uma diferença estatística significativa foi observada entre o pH da amostra VRC—AL (7,67) e os de todas as demais: VRC—A (8,08), VRC—L (8,26) e VRC—STD (8,57), as quais são estatisticamente iguais. Além disso, os valores de pH determinados nas amostras VRC—A e VRC—L são estatisticamente iguais (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

4.3.4. Matéria Orgânica (MO)

De acordo com os resultados observados, todas as amostras tenderam a diminuir seus teores de MO durante a vermicompostagem (Tabela 9 — I e Figura 16 — I), com exceção da amostra VRC—AL, na qual os valores de MO variaram discretamente ao longo do processo. Além disso, desde o início da vermicompostagem a amostra VRC—AL apresentou um teor de MO abaixo dos demais tratamentos (35,70%).

Nota-se que as maiores reduções percentuais nos teores de MO — na comparação entre os valores determinados no início e no final do processo — foram observadas nas amostras que apresentaram maior concentração de MO em $t = 0$ dias: VRC—STD (13,07%) > VRC—L (10,61%) > VRC—A (7,32%) > VRC—AL (5,32%).

Aos 135 dias, apenas o vermicomposto VRC—AL apresentou um teor de MO estatisticamente diferente dos demais (33,80%), os quais são estatisticamente iguais: VRC—STD (36,04%), VRC—L (36,24%) e VRC—A (36,98%) (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

4.3.5. Carbono orgânico total (TOC)

Ao analisar os valores obtidos de TOC (Tabela 10 — I e Figura 17 — I), nota-se que as amostras VRC—L e VRC—A apresentaram uma tendência de decaimento em seus teores de TOC ao longo da vermicompostagem, comportamento este que não foi observado nas demais amostras, VRC—STD e VRC—AL, nas quais os valores obtidos variaram aleatoriamente.

Mesmo apresentado valores que não indicaram uma tendência de decaimento ao longo da vermicompostagem, a maior redução nos teores de TOC foi observada na amostra VRC—STD, 49,59%. Nas demais amostras esta redução foi de 24,05% para VRC—STD e 35,44% para VRC—L. Além disso, a amostra VRC—AL apresentou um comportamento atípico, fora do esperado, apresentando um pequeno aumento em seu teor de TOC (3,57%).

Ao término das vermicompostagens, as amostras VRC—A e VRC—STD não apresentaram diferenças significativas em seus teores de TOC (17,65 e 14,64%, respectivamente). O mesmo ocorreu com as amostras VRC—L (21,66%) e VRC—AL (25,47%) (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Tabela 8 — I. Monitoramento do pH durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3).

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	8,61 $\pm$ 0,02d	8,67 $\pm$ 0,01f	8,46 $\pm$ 0,01e	8,65 $\pm$ 0,24c
15 Dias	8,62 $\pm$ 0,02de	8,63 $\pm$ 0,02e	8,48 $\pm$ 0,01e	8,63 $\pm$ 0,04c
30 Dias	8,65 $\pm$ 0,01e	8,54 $\pm$ 0,01d	8,32 $\pm$ 0,04d	8,56 $\pm$ 0,02b
45 Dias	8,60 $\pm$ 0,01cd	8,47 $\pm$ 0,02c	8,24 $\pm$ 0,01c	8,77 $\pm$ 0,07d
60 Dias	8,57 $\pm$ 0,02c	8,46 $\pm$ 0,02c	8,25 $\pm$ 0,03c	8,76 $\pm$ 0,01d
90 Dias	8,38 $\pm$ 0,01b	8,03 $\pm$ 0,07a	8,01 $\pm$ 0,03b	8,00 $\pm$ 0,03a
135 Dias	8,26 $\pm$ 0,04Ba	8,08 $\pm$ 0,9Bab	7,67 $\pm$ 0,00Aa	8,57 $\pm$ 0,02Cb

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 15 — I. Monitoramento do pH durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Tabela 9 — I. Monitoramento da matéria orgânica (MO) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	40,54 $\pm$ 0,97c	39,90 $\pm$ 0,76c	35,70 $\pm$ 0,22b	41,46 $\pm$ 0,84de
15 Dias	39,78 $\pm$ 0,38bc	37,69 $\pm$ 0,52ab	34,02 $\pm$ 2,14a	40,01 $\pm$ 0,74d
30 Dias	40,38 $\pm$ 1,49c	39,55 $\pm$ 0,30c	34,34 $\pm$ 0,24a	40,70 $\pm$ 0,15d
45 Dias	37,73 $\pm$ 0,08ab	38,59 $\pm$ 1,09bc	33,86 $\pm$ 1,70a	38,87 $\pm$ 1,08bc
60 Dias	37,64 $\pm$ 0,91ab	36,98 $\pm$ 0,23a	34,55 $\pm$ 0,60a	39,35 $\pm$ 0,09cd
90 Dias	40,45 $\pm$ 0,04c	38,31 $\pm$ 0,48	35,51 $\pm$ 0,29b	40,99 $\pm$ 0,24d
135 Dias	36,24 $\pm$ 0,56Ba	36,98 $\pm$ 0,29Ba	33,80 $\pm$ 0,48Aa	36,04 $\pm$ 0,40Ba

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 16 — I. Monitoramento da matéria orgânica (MO) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Tabela 10 — I. Monitoramento do carbono orgânico total (TOC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em mg kg⁻¹.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	28,52 $\pm$ 0,74ef	27,34 $\pm$ 0,42d	24,56 $\pm$ 0,54d	29,04 $\pm$ 4,82ef
15 Dias	28,40 $\pm$ 0,97ef	27,31 $\pm$ 0,11d	26,71 $\pm$ 0,35e	18,71 $\pm$ 0,01b
30 Dias	27,83 $\pm$ 1,06de	27,72 $\pm$ 0,13d	21,38 $\pm$ 2,52bc	24,93 $\pm$ 0,55
45 Dias	26,90 $\pm$ 2,61cd	29,86 $\pm$ 0,14e	26,78 $\pm$ 0,09f	25,81 $\pm$ 0,34d
60 Dias	25,61 $\pm$ 0,15c	24,66 $\pm$ 0,65c	18,82 $\pm$ 2,85a	23,87 $\pm$ 0,99c
90 Dias	24,79 $\pm$ 1,81bc	23,34 $\pm$ 1,14b	23,07 $\pm$ 0,69c	25,66 $\pm$ 2,19de
135 Dias	21,66 $\pm$ 3,08Ca	17,65 $\pm$ 3,93ABa	25,47 $\pm$ 0,23CDef	14,64 $\pm$ 0,77Aa

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 17 — I. Monitoramento do carbono orgânico total (TOC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

4.3.6. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A CTC (Tabela 13 — I e Figura 20 — I) foi determinada por meio da soma da acidez trocável (A) (Tabela 11 — I e Figura 18 — I) e das bases trocáveis (B) (Tabela 12 — I e Figura 19 — I).

Os valores de acidez trocável (A) variaram de forma semelhante em todas as amostras, com exceção ao tratamento VRC—L. Nas amostras VRC—A, VRC—AL e VRC—STD os valores de A tenderam a aumentar gradualmente nos primeiros 30 dias, diminuindo em seguida. Porém, a amostra VRC—L permaneceu sem variar significativamente seus valores de A entre 0-45 dias ($8,62\text{--}9,22\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$). Aos 60 dias, seu valor de A subiu $\sim 33\%$, diminuindo aos poucos, até o final dos experimentos, 135 dias. A amostra VRC—AL foi a que apresentou o maior valor A ($13,33\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$) e a maior variação entre os tempos 0-135 dias ($40,81\%$). Já o menor valor foi determinado na amostra VRC—L ($9,89\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$).

As bases trocáveis (B) evoluíram de forma independente ao longo do tempo, em todas as amostras. Contudo, entre os tempos de 0-135 dias, variações de B foram bastante significativas. Na amostra VRC—STD, por exemplo, esta diferença foi de $\sim 328\%$, ou seja, $315,28\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ a mais, entre o início e o final da vermicompostagem. Para as amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL essa diferença foi um aumento de $\sim 290\%$, 120% e 90% , respectivamente. Contudo, todos valores de B são estatisticamente iguais (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Em geral, todas as amostras apresentaram um aumento expressivo e significativo em seus valores de CTC entre o início e final da vermicompostagem (0-135 dias): VRC—STD ($\sim 300\%$ de aumento) $>$ VRC—L (270%) $>$ VRC—A (120%) $>$ VRC—AL (90%). Ao comparar os valores de A e B, nota-se que B é ~ 40 vezes maior que A. Logo, a CTC (Tabela 13 — I e Figura 20 — I) — que é a soma de ambos os atributos — seguiu a mesma tendência observado em B, em todas as amostras (Tabela 12 — I e Figura 19 — I). O vermicomposto que apresentou menor CTC foi a amostra controle, seguida pelos demais tratamentos: VRC—STD ($424,48\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$) $<$ VRC—L ($451,90\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$) $<$ VRC—A ($459,38\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$) $<$ VRC—AL ($478,89\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$). Estatisticamente, todos os valores de CTC são iguais (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

A partir da CTC e de B, a saturação por bases (V%) foi calculada (Tabela 14 — I e Figura 21 — I). Os resultados obtidos indicam que ambos os atributos apresentaram valores bastante parecidos, ou seja, a CTC esteve mais relacionada às bases trocáveis que à acidez. A razão entre CTC e B — que resulta em V% — permaneceu em $\sim 100\%$ do tempo 0-135 dias de vermicompostagem, em todas as amostras, com valores estatisticamente iguais entre os tempos de análise — salvo poucas exceções — e, também, nos vermicompostos ($97,03\text{--}97,69\%$) (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Tabela 11 — I. Monitoramento da acidez trocável (A) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	8,78 $\pm$ 0,66a	7,42 $\pm$ 0,19a	7,89 $\pm$ 0,29a	8,20 $\pm$ 0,89a
15 Dias	9,22 $\pm$ 0,12ab	8,65 $\pm$ 0,40b	8,59 $\pm$ 0,13b	10,30 $\pm$ 1,10c
30 Dias	8,53 $\pm$ 0,82a	11,13 $\pm$ 0,44de	10,32 $\pm$ 1,28d	13,93 $\pm$ 0,27e
45 Dias	8,62 $\pm$ 0,86a	10,69 $\pm$ 1,32cd	9,12 $\pm$ 0,48c	12,90 $\pm$ 2,49de
60 Dias	12,15 $\pm$ 3,27bc	10,75 $\pm$ 3,00cde	8,51 $\pm$ 1,17bc	12,51 $\pm$ 1,21d
90 Dias	10,82 $\pm$ 2,41bc	8,88 $\pm$ 0,21b	9,70 $\pm$ 1,77cd	9,43 $\pm$ 0,37b
135 Dias	9,89 $\pm$ 0,70Ab	10,63 $\pm$ 0,36ABcd	13,33 $\pm$ 1,12Be	12,52 $\pm$ 1,45Bde

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 18 — I. Monitoramento da acidez trocável (A) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Tabela 12 — I. Monitoramento das bases trocáveis (B) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	112,93 $\pm$ 53,75a	200,40 $\pm$ 44,05a	244,16 $\pm$ 62,25a	96,68 $\pm$ 14,04a
15 Dias	314,22 $\pm$ 32,60de	394,66 $\pm$ 81,21de	363,69 $\pm$ 31,37b	312,56 $\pm$ 3,71c
30 Dias	364,77 $\pm$ 50,64ef	254,64 $\pm$ 40,82bcd	445,36 $\pm$ 112,83c	438,53 $\pm$ 11,49de
45 Dias	293,63 $\pm$ 9,87c	267,04 $\pm$ 29,19cd	246,48 $\pm$ 86,09a	318,76 $\pm$ 20,87c
60 Dias	170,22 $\pm$ 30,04b	376,89 $\pm$ 30,56f	389,87 $\pm$ 17,52b	136,69 $\pm$ 0,39b
90 Dias	406,61 $\pm$ 21,38f	365,57 $\pm$ 3,65ef	370,68 $\pm$ 12,29b	451,85 $\pm$ 10,51e
135 Dias	442,01 $\pm$ 41,77ABg	448,76 $\pm$ 7,99ABg	465,56 $\pm$ 55,13ABc	411,96 $\pm$ 24,40Ad

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.
LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 19 — I. Monitoramento das bases trocáveis (B) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Tabela 13 — I. Monitoramento da capacidade de troca catiônica (CTC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	121,72 $\pm$ 53,14ab	207,82 $\pm$ 44,24a	252,05 $\pm$ 62,00a	104,88 $\pm$ 13,53a
15 Dias	323,43 $\pm$ 32,71de	403,31 $\pm$ 81,00ef	372,28 $\pm$ 31,48b	322,87 $\pm$ 4,81c
30 Dias	373,30 $\pm$ 49,84ef	265,76 $\pm$ 40,54b	455,68 $\pm$ 114,10de	452,46 $\pm$ 11,76e
45 Dias	302,25 $\pm$ 9,09cd	277,73 $\pm$ 29,10bc	255,60 $\pm$ 86,52a	331,66 $\pm$ 23,36cd
60 Dias	182,37 $\pm$ 28,49b	387,64 $\pm$ 32,55de	398,38 $\pm$ 16,64bcd	149,20 $\pm$ 1,60b
90 Dias	417,44 $\pm$ 19,26f	374,45 $\pm$ 3,85d	380,38 $\pm$ 10,58bcd	461,28 $\pm$ 10,14e
135 Dias	451,90 $\pm$ 42,46ABfg	459,38 $\pm$ 8,35ABfg	478,89 $\pm$ 56,25ABe	424,48 $\pm$ 22,95Ad

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 20 — I. Monitoramento da capacidade de troca catiônica (CTC) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Tabela 14 — I. Monitoramento da saturação por bases (V%) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	91,83 $\pm$ 3,26a	96,32 $\pm$ 0,78ab	96,73 $\pm$ 0,89a	92,05 $\pm$ 1,74a
15 Dias	97,13 $\pm$ 0,25bc	97,80 $\pm$ 0,45ab	97,68 $\pm$ 0,17a	96,81 $\pm$ 0,29b
30 Dias	97,67 $\pm$ 0,49bc	95,74 $\pm$ 0,75a	97,69 $\pm$ 0,27a	96,92 $\pm$ 0,02b
45 Dias	97,14 $\pm$ 0,37bc	96,12 $\pm$ 0,60ab	96,22 $\pm$ 0,94a	96,13 $\pm$ 0,48b
60 Dias	93,17 $\pm$ 2,30ab	97,24 $\pm$ 0,63ab	97,85 $\pm$ 0,37a	91,62 $\pm$ 0,72b
90 Dias	97,39 $\pm$ 0,67bc	97,63 $\pm$ 0,03ab	97,44 $\pm$ 0,54a	97,95 $\pm$ 0,13b
135 Dias	97,81 $\pm$ 0,05Abc	97,69 $\pm$ 0,04Aab	97,21 $\pm$ 0,09Aa	97,03 $\pm$ 0,50Ab

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 21 — I. Monitoramento da saturação por bases (V%) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

4.3.7. Relação C:N

A relação C:N (Tabela 17 — I e Figura 24 — I) foi determinada por meio da razão atômica dos teores de carbono (Tabela 15 — I e Figura 22 — I) e nitrogênio (Tabela 16 — I e Figura 23 — I), valores obtidos via análise elementar. Conforme o esperado, a relação C:N diminuiu ao longo da vermicompostagem. Matematicamente, para que isso ocorresse, os valores de C deveriam diminuir e os teores de N, aumentar.

Em geral, os teores de C tenderam a diminuir ao longo da vermicompostagem. Comparando os valores obtidos entre os tempos 0-135 dias, as diminuições observadas foram VRC—L (~ 55%) < VRC—STD (64%) < VRC—A (65%) < VRC—AL (73%). Estatisticamente, o único vermicomposto com um teor de C diferente dos demais foi a amostra controle, VRC—STD. Todas as demais apresentaram teores de C estatisticamente iguais (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Já os teores de N apresentaram um comportamento atípico do esperado. Com exceção da amostra VRC—AL, todos as demais completaram os 135 dias com valores de N estatisticamente iguais aos determinados no tempo inicial (0 dias). Em geral, nos dias 30 ou 45 ocorreu um aumento nos teores de N, com exceção da amostra VRC—AL. Provavelmente, este acréscimo deveu-se à liberação de amônia em função da atividade microbiana ocorrida no trato digestivo das minhocas (Plaza et al., 2008; Lee, 1985).

Em função dos teores de C e N determinados, a relação C:N decaiu em todos os vermicompostores ao longo dos experimentos. No início da vermicompostagem (tempo = 0 dias), os tratamentos contendo os resíduos de curtume apresentaram uma relação C:N abaixo do valor calculado para a amostra controle: VRC—AL (18,14) < VRC—A (18,24) < VRC—L (18,73) < VRC—STD (27,12). Ao final do processo, as relações C:N calculadas para os vermicompostos foram VRC—AL (2,68) < VRC—A (6,26) < VRC—L (8,14) < VRC—STD (8,94). Estatisticamente, a relação C:N da amostra VRC—AL é significativamente diferente das demais, as quais são estatisticamente iguais (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Tabela 15 — I. Monitoramento do teor de carbono — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	37,38 $\pm$ 5,13e	41,85 $\pm$ 2,91e	40,55 $\pm$ 2,82d	57,93 $\pm$ 10,48e
15 Dias	42,52 $\pm$ 3,78ef	38,56 $\pm$ 1,98de	39,67 $\pm$ 3,64d	23,57 $\pm$ 7,86d
30 Dias	29,94 $\pm$ 2,17cd	30,03 $\pm$ 4,31c	25,77 $\pm$ 0,67c	16,00 $\pm$ 1,86b
45 Dias	26,84 $\pm$ 11,99bc	17,23 $\pm$ 3,27a	18,39 $\pm$ 7,19bc	30,74 $\pm$ 10,25
60 Dias	21,39 $\pm$ 7,13b	24,85 $\pm$ 13,43b	15,00 $\pm$ 3,39ab	13,20 $\pm$ 0,73a
90 Dias	17,46 $\pm$ 3,67a	17,13 $\pm$ 2,05a	12,74 $\pm$ 1,56a	20,57 $\pm$ 1,25cd
135 Dias	16,82 $\pm$ 2,86ABa	14,69 $\pm$ 2,84ABa	10,75 $\pm$ 4,89Aa	20,78 $\pm$ 0,99Ccd

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 22 — I. Monitoramento do teor de carbono — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Tabela 16 — I. Monitoramento do nitrogênio — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em %.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	2,02 $\pm$ 0,20a	2,31 $\pm$ 0,17a	2,27 $\pm$ 0,31b	2,13 $\pm$ 0,08b
15 Dias	2,01 $\pm$ 0,28a	2,29 $\pm$ 0,34a	2,34 $\pm$ 0,45b	1,50 $\pm$ 0,50a
30 Dias	2,06 $\pm$ 0,10a	2,65 $\pm$ 0,09a	2,04 $\pm$ 0,19ab	1,81 $\pm$ 0,10ab
45 Dias	3,09 $\pm$ 1,27ab	2,34 $\pm$ 0,55a	2,28 $\pm$ 0,71b	3,43 $\pm$ 1,14c
60 Dias	2,81 $\pm$ 0,94ab	3,45 $\pm$ 1,33ab	2,17 $\pm$ 0,22b	1,62 $\pm$ 0,14a
90 Dias	2,22 $\pm$ 0,32a	2,47 $\pm$ 0,33a	1,56 $\pm$ 0,24a	2,62 $\pm$ 0,19b
135 Dias	2,07 $\pm$ 0,00Aa	2,40 $\pm$ 0,47Aa	4,21 $\pm$ 1,13Bc	2,33 $\pm$ 0,01Ab

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 23 — I. Monitoramento do nitrogênio — via análise elementar (CHN) — durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3).

Tabela 17 — I. Monitoramento da relação C:N durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
0 Dias	18,73 $\pm$ 4,02d	18,24 $\pm$ 2,35de	18,14 $\pm$ 3,44e	27,12 $\pm$ 3,93d
15 Dias	21,25 $\pm$ 1,12de	17,00 $\pm$ 2,20d	17,15 $\pm$ 1,85e	15,72 $\pm$ 0,00c
30 Dias	14,53 $\pm$ 0,32c	11,36 $\pm$ 1,69c	12,66 $\pm$ 0,93d	8,82 $\pm$ 0,54ab
45 Dias	8,64 $\pm$ 0,53ab	7,42 $\pm$ 0,42ab	7,90 $\pm$ 1,37b	8,97 $\pm$ 0,00ab
60 Dias	7,61 $\pm$ 0,00a	6,92 $\pm$ 1,07a	6,86 $\pm$ 0,98b	8,21 $\pm$ 1,01ab
90 Dias	7,83 $\pm$ 0,55a	7,06 $\pm$ 1,69ab	8,24 $\pm$ 0,80bc	7,87 $\pm$ 0,11a
135 Dias	8,14 $\pm$ 1,39BCab	6,26 $\pm$ 1,44Ba	2,68 $\pm$ 1,20Aa	8,94 $\pm$ 0,48BCab

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico.

Figura 24 — I. Monitoramento da relação C:N durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

4.4. Monitoramento do Cr

Por meio de extrações e o uso de espectrometria de absorção atômica (AAS), foi possível analisar a dinâmica do Cr ao longo do processo de vermicompostagem (Tabela 18 — I).

Conforme o esperado, a amostra VRC—STD apresentou valores de Cr total, Cr (III) e Cr (VI) abaixo do limite de quantificação (LOQ) ($79,80 \mu\text{g kg}^{-1}$). Nas amostras contendo resíduos de curteume, os valores observados de Cr total se mantiveram constantes durante toda a vermicompostagem, variando entre $14,02\text{--}16,01 \text{ mg kg}^{-1}$ para a amostra VRC—L, entre $11,68\text{--}12,11 \text{ mg kg}^{-1}$ para a amostra VRC—A e de $13,08\text{--}13,76 \text{ mg kg}^{-1}$ para VRC—AL, com valores estatisticamente iguais em todos os tempos de análise (ANOVA One-way, $P < 0,05$). Sabe-se que a abertura por MAE libera para a análise todo o Cr presente na amostra — cromo de constituição e em seus estados disponíveis, iônicos em solução. Uma vez que o Cr não foi introduzido e nem removido do meio durante a vermicompostagem, era esperado que o valor de Cr total se mantivesse constante ao longo do processo.

Quanto aos íons, os teores de Cr (VI) diminuíram ao longo da vermicompostagem (Tabela 18 — I). A amostra VRC—L apresentou um valor inicial de Cr (VI) igual a $0,08 \text{ mg kg}^{-1}$, próximo ao LOQ e, aos 30 dias, já não era mais possível detectá-lo (Figura 25 — I). Já a amostra VRC—A iniciou a vermicompostagem com $0,81 \text{ mg kg}^{-1}$ e foi diminuindo gradualmente, não sendo mais detectado a partir dos 45 dias (Figura 26 — I). Já a amostra VRC—AL iniciou a vermicompostagem com $0,75 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cr (VI) e foi detectado até 30 dias do processo.

Já os valores determinados de Cr (III) tenderam a aumentar ao longo dos primeiros 30 dias, provavelmente devido à liberação dos íons ao longo da degradação química e microbiológica dos resíduos e, também, a bioconversão do Cr (VI) a Cr (III). A partir daí os valores diminuíram gradualmente, provavelmente devido à complexação dos íons e à sua sorção na MO do vermicomposto. Aos 135 dias, os vermicompostos apresentaram quantidades estatisticamente diferentes de Cr (III) (ANOVA One-way, $P < 0,05$). A amostra VRC—A apresentou maior concentração de Cr (III) ($7,47 \text{ mg kg}^{-1}$), seguida pelos tratamentos VRC—A ($4,33 \text{ mg kg}^{-1}$) e VRC—AL ($1,09 \text{ mg kg}^{-1}$).

Figura 25 — I. Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem da amostra VRC—L, nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP).

Figura 26 — I. Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem da amostra VRC—A, nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP).

Figura 27 — I. Monitoramento dos teores de Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem da amostra VRC—AL, nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média ± DP).

Tabela 18 — I. Monitoramento dos teores de Cromo total, Cr (III) e Cr (VI) durante a vermicompostagem dos resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL), nos tempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90 e 135 dias (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em mg kg⁻¹.

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL
Cr total			
0 Dias	14,21 $\pm$ 0,97ab	11,68 $\pm$ 0,42a	13,54 $\pm$ 1,00a
15 Dias	14,02 $\pm$ 0,09a	12,04 $\pm$ 2,01a	13,21 $\pm$ 0,15a
30 Dias	15,03 $\pm$ 0,35b	12,01 $\pm$ 1,83a	13,76 $\pm$ 0,04a
45 Dias	14,56 $\pm$ 0,21ab	11,97 $\pm$ 1,01a	13,08 $\pm$ 1,12a
60 Dias	15,27 $\pm$ 0,83b	11,98 $\pm$ 0,33a	13,49 $\pm$ 0,29a
90 Dias	16,01 $\pm$ 0,04b	12,11 $\pm$ 0,27a	13,10 $\pm$ 1,12a
135 Dias	14,02 $\pm$ 1,23Aab	11,69 $\pm$ 3,12Aa	13,53 $\pm$ 0,09ABa
Cr (III)			
0 Dias	4,61 $\pm$ 0,14a	8,16 $\pm$ 0,94bc	8,11 $\pm$ 2,14cd
15 Dias	8,04 $\pm$ 0,89d	6,08 $\pm$ 2,69a	8,12 $\pm$ 0,39d
30 Dias	10,95 $\pm$ 0,59e	8,74 $\pm$ 1,44bc	12,21 $\pm$ 1,29e
45 Dias	9,08 $\pm$ 1,20de	11,10 $\pm$ 0,47e	8,46 $\pm$ 2,10cd
60 Dias	7,89 $\pm$ 0,01bc	9,89 $\pm$ 0,89cd	6,37 $\pm$ 1,76c
90 Dias	6,19 $\pm$ 1,97b	10,30 $\pm$ 0,58de	2,61 $\pm$ 0,53b
135 Dias	4,33 $\pm$ 1,30Ba	7,47 $\pm$ 1,01Cab	1,09 $\pm$ 0,80Aa
Cr (VI)			
0 Dias	0,08 $\pm$ 0,06a	0,81 $\pm$ 0,07b	0,75 $\pm$ 0,08b
15 Dias	0,07 $\pm$ 0,04a	0,83 $\pm$ 0,01b	0,93 $\pm$ 0,12c
30 Dias	< LOQ	0,68 $\pm$ 0,06a	0,45 $\pm$ 0,01a
45 Dias	< LOQ	0,62 $\pm$ 0,11a	< LOQ
60 Dias	< LOQ	< LOQ	< LOQ
90 Dias	< LOQ	< LOQ	< LOQ
135 Dias	< LOQ	< LOQ	< LOQ

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes tempos, de 0-135 dias. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no tempo de 135 dias, ao final da vermicompostagem.

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico. LOQ Limite de quantificação.

4.5. RESUMO — Atributos químicos e de fertilidade dos vermicompostos

A tabela a seguir apresenta um resumo dos resultados obtidos nas caracterizações dos vermicompostos. Os dados apresentados estão relacionados aos atributos químicos e de fertilidade de cada amostra estudada (Tabela 19 — I).

Tabela 19 — I. RESUMO — Atributos químicos e de fertilidade dos vermicompostos preparados a partir resíduos de curtume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) e amostra controle (amostra VRC—STD) (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).

	VRC—L	VRC—A	VRC—AL	VRC—STD
ST %	49,02 $\pm$ 0,89ab	52,03 $\pm$ 1,97c	53,86 $\pm$ 2,85c	47,16 $\pm$ 0,38a
pH	8,26 $\pm$ 0,04b	8,08 $\pm$ 0,9b	7,67 $\pm$ 0,00a	8,57 $\pm$ 0,02c
MO %	36,24 $\pm$ 0,56b	36,98 $\pm$ 0,29b	33,80 $\pm$ 0,48a	36,04 $\pm$ 0,40b
TOC %	21,66 $\pm$ 3,08c	17,65 $\pm$ 3,93ab	25,47 $\pm$ 0,23cd	14,64 $\pm$ 0,77a
CTC				
A cmolc kg ⁻¹	9,89 $\pm$ 0,70a	10,63 $\pm$ 0,36ab	13,33 $\pm$ 1,12b	12,52 $\pm$ 1,45b
B cmolc kg ⁻¹	442,01 $\pm$ 41,77a	448,76 $\pm$ 7,99ab	465,56 $\pm$ 55,13ab	411,96 $\pm$ 24,40a
V% %	97,81 $\pm$ 0,05a	97,69 $\pm$ 0,04a	97,21 $\pm$ 0,09a	97,03 $\pm$ 0,50a
CTC cmolc kg ⁻¹	451,90 $\pm$ 42,46ab	459,38 $\pm$ 8,35ab	478,89 $\pm$ 56,25ab	424,48 $\pm$ 22,95a
Análise Elementar				
C %	16,82 $\pm$ 2,86ab	14,69 $\pm$ 2,84ab	10,75 $\pm$ 4,89a	20,78 $\pm$ 0,99c
N %	2,07 $\pm$ 0,00a	2,40 $\pm$ 0,47a	4,21 $\pm$ 1,13b	2,33 $\pm$ 0,01a
Relação C:N	8,14 $\pm$ 1,39bc	6,26 $\pm$ 1,44b	2,68 $\pm$ 1,20a	8,94 $\pm$ 0,48bc
Cromo				
Cr total mg kg ⁻¹	14,02 $\pm$ 1,23a	11,69 $\pm$ 3,12a	13,53 $\pm$ 0,09ab	< LOQ
Cr (III) mg kg ⁻¹	4,33 $\pm$ 1,30b	7,47 $\pm$ 1,01c	1,09 $\pm$ 0,80a	< LOQ
Cr (VI) mg kg ⁻¹	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ

Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em P < 0,05 de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: ST Sólidos totais; MO Matéria orgânica; TOC Carbono orgânico total; CTC Capacidade de troca catiônica; A Acidez trocável; B Bases trocáveis; V% Saturação por bases. VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico. LOQ Limite de quantificação.

5. DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos resíduos frescos

Os resíduos frescos apresentaram características químicas que possibilitaram sua vermicompostagem. O único atributo que indicou um valor preocupante foi o pH. As aparas e a serragem apresentaram valores de acidez elevada (3,31 e 4,84, respectivamente). Porém, como o volume adicionado destes resíduos era pequeno, comparado à quantidade de esterco, esperava-se que não houvesse interferência na adaptação das minhocas no vermicompostor, conforme foi observado.

De acordo com trabalhos publicados na literatura, as características químicas dos resíduos frescos podem variar drasticamente, conforme demonstrado em estudos já publicados. Por exemplo, Vig et al. (2011) obtiveram um vermicomposto com boas características químicas a partir de um lodo de curtume com as seguintes características:

- i. pH: 8,36
- ii. relação C:N: 151,73
- iii. TOC: 34,90%

e um esterco bovino com:

- i. pH: 8,63
- ii. relação C:N: 15,58
- iii. TOC: 18,70%

Em um estudo publicado por Ravindran et al. (2008), estudou-se a vermicompostagem de pele fresca (precursor das aparas curtidas). Os resíduos utilizados também apresentaram características bem distintas. As peles frescas possuíam:

- i. pH 7,9
- ii. relação C:N: 15,5
- iii. TOC: 38,0 %

e esterco bovino com:

- i. pH 7,89
- ii. Relação C:N: 62,0
- iii. TOC 40,3%.

Nesses estudos os resíduos utilizados são de origem biológica e/ou industrial, justificando a grande variação nos atributos de fertilidade apresentados na maioria dos estudos. Embora as características químicas tenham variado, em todos os estudos foi obtido um vermicomposto com boas características químicas, de fertilidade e nutrição vegetal. Além disso, em todos os casos ocorreu uma boa adaptação das minhocas ao meio, sem prejudicar os processos da vermicompostagem.

Comparado às características químicas dos resíduos utilizados neste estudo, mesmo apresentando tamanha diferença, os resultados obtidos foram igualmente bons ou melhores. Os itens abaixo apresentam as discussões pertinentes

aos resultados obtidos no que se refere à adaptação das minhocas, ao monitoramento da vermicompostagem e à dinâmica do cromo.

5.2. Monitoramento das minhocas *E. fetida*

A adaptação das minhocas pode ser entendida em função de sua sobrevivência e desenvolvimento durante a vermicompostagem. Os dados abaixo comparam os resultados obtidos neste estudo com outros encontrados na literatura:

- i. Wong et al. (2012) observaram que as minhocas utilizadas em seu experimento ganharam massa até a 8-10ª semana (56-70 dias) de experimento, diminuindo em seguida.
- ii. Singh e Suthar (2012) reportaram um ganho de massa apenas até o 10º dia. Neste estudo, as minhocas se desenvolveram até a 19ª semana (135 dias). Após esta data o experimento deixou de ser monitorado, devido ao longo tempo e às características ótimas obtidas em seus vermicompostos.

Ao comparar estes dados com os desse estudo, inicialmente nota-se que as minhocas da amostra controle (VRC—STD) não apresentaram o mesmo desenvolvimento observado nos tratamentos contendo os resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL), crescendo e ganhando massa apenas até a 2ª semana. Diferente destes outros estudos, as minhocas que foram cultivadas nos meios contendo resíduos de curtume cresceram durante todo o experimento (135 dias). Estes resultados garantiram um diferencial nas características dos vermicompostos produzidos, obtendo parâmetros de fertilidade bem superiores aos da amostra controle, conforme discutido nos itens seguintes. Além disso, pode-se considerar que os componentes químicos dos resíduos de curtume foram nutrientes para as minhocas. Embora não existam estudos na literatura sobre o efeito de doses de Cr — ou sobre as consequências da presença desse elemento químico — na nutrição de minhocas, os resíduos foram o único diferencial entre os tratamentos, suportando tal conclusão.

5.3. Monitoramento da vermicompostagem

Analisando a evolução dos atributos químicos, todos tenderam a se desenvolver conforme o esperado. Embora algumas exceções tenham sido observadas, durante a vermicompostagem, os parâmetros que deveriam ter os seus valores decrescidos são: pH, MO, TOC, C (para cálculo da relação C:N) e a relação C:N. Na contramão desta diminuição, os parâmetros: N (para o cálculo da relação C:N), a acidez trocável (A), as bases trocáveis (B) e a CTC, deveriam ter seus valores elevados.

Os valores de pH diminuíram em todos os tratamentos que continham os resíduos de curtume. Isso provavelmente ocorreu devido aos seguintes fatores (Ndegwa e Thompson, 2000; Ndegwa et al., 2000):

- i. Produção de dióxido de carbono (CO_2);
- ii. Mineralização do nitrogênio a nitratos (NO_3^-) ou nitritos (NO_2^-);
- iii. Mineralização do fósforo à ortofosfatos (PO_4^{-3}); e
- iv. Bioconversão de compostos orgânicos presentes na estrutura dos resíduos em ácidos orgânicos, devido à atividade microbiana.

Resultados semelhantes (diminuição do pH) também foram observados por Wong et al. (2012) e Kaur et al. (2010). Em contraste, os valores de pH reportados por Vig et al. (2011) aumentaram em aproximadamente 1 unidade de pH em todas

as misturas de lodo de curtume e esterco bovino. Este aumento foi atribuído à composição química do lodo, que pode ter influenciado no processo de vermicompostagem e seus resultados.

De acordo com Elvira et al. (1996) e Ravindran et al. (2008), as minhocas *E. fetida* podem modificar as condições do meio em que vivem (substrato). Estes organismos podem, por exemplo:

- i. Aumentar as perdas de carbono por meio da respiração microbiana sob a forma de CO_2 ;
- ii. Degradar e fornecer algumas enzimas extracelulares para os resíduos em decomposição. Isto se dá por meio de mecanismos bioquímicos dentro de seu trato digestivo.

Ambas as ações conduzem às perdas de TOC e MO, conforme foi observado nos resultados reportados. Nestes processos, os valores de MO tendem a diminuir devido às transformações físicas e químicas que ocorrem com o tempo, envolvendo modificações estruturais, as quais tornam a MO mais transformada, recalcitrante e, conseqüentemente, mais resistente a degradação térmica. Os valores de TOC diminuíram principalmente nos vermicompostores VRC—L, VRC—A e, também, na amostra controle (VRC—STD). Esta tendência (redução dos teores de TOC) também foi observada por Singh e Suthar (2012), Vig et al. (2011) e Ravindran et al. (2008).

Durante o período de vermicompostagem (135 dias), a CTC aumentou para valores altos e significativos. CTC é um indicador importante para a fertilidade do solo e insumos agrícolas. Valores altos para a CTC indicam que o vermicomposto possui um maior número de cátions trocáveis — Na^+ , K^+ , Mg^{+2} e Ca^{+2} — com espécies trocáveis que não conferem nutrição às plantas — Al^{+3} e H^+ — e que fazem parte da constituição natural do solo e/ou insumos orgânicos (Chiba e Camargo, 2015).

De acordo com os resultados reportados, todos valores de relação C:N diminuíram em todas as amostras. Conforme mencionado anteriormente, durante a vermicompostagem, ocorre a diminuição dos teores de carbono orgânico e, também, o aumento nos níveis de nitrogênio. Matematicamente, isso resulta em menores valores de relação C:N.

Para a diminuição do teor de carbono, consideram-se válidos os mesmos itens discutidos para a redução dos teores de TOC. Entre as possíveis razões para o aumento do teor de N, citam-se, principalmente (Plaza et al., 2008; Lee, 1985):

- i. A produção de amônia (NH_3), expelida pelo sistema excretor das minhocas; e
- ii. A fixação de nitrogênio realizada pela ação de bactérias N-fixadores presentes nos resíduos e no SO.

Em geral, a relação C:N é um bom parâmetro para determinar se ocorreu ou não a vermicompostagem de um resíduo orgânico. Resultados semelhantes (redução da relação C:N) foram reportados por Ravindran et al. (2008), Vig et al. (2011), Wong et al. (2012), entre outros.

5.4. Monitoramento do Cr

As análises e monitoramento do Cr ocorreram por meio de observações dos teores de Cr total e de suas espécies disponíveis na solução do vermicomposto, Cr (III) e Cr (VI). Conforme foi mencionado na introdução, a vermicompostagem é uma tecnologia que pode ser aplicada no tratamento de patógenos, xenobióticos, entre outros contaminantes químicos. Tratando-se do Cr, seu estado hexavalente é indesejável, uma vez que apresenta riscos à saúde humana e a todo o ambiente em geral. Assim, espera-se reduzi-lo ao seu estado trivalente, que é nutriente e desejável às práticas agrícolas e a nutrição — humana e vegetal — desde que em quantidade ótima (Nunes et al., 2016; Ramesh et al., 2009; Khan, 2001).

Nas condições aplicadas neste estudo, a vermicompostagem se mostrou eficiente na redução do Cr (VI). Em todas as amostras os teores de Cr (VI) foram observados abaixo LOQ após 60 dias de vermicompostagem. Além disso, uma variação nos teores de Cr (III) foi observada. Uma vez ocorrida a bioconversão destas espécies — Cr (VI) reduzido a Cr (III)

— naturalmente se elevaria o teor de Cr (III), produto desta reação. Porém, as variações dos teores de Cr (III) foi mais acentuada que o teor de Cr (VI) reduzido, indicando que, além da quantidade de Cr reduzida, outros processos químicos e físicos podem ter ocorrido, por exemplo, a sorção desses íons na MO, SH etc., variando a quantidade de Cr (III) disponível na fração solúvel e disponível dos vermicompostos.

Ackerley et al. (2004) e Arillo e Melodia (1991) sugerem que a redução de Cr (VI) a Cr (III) ocorra devido à ação dos micro-organismos que vivem no trato digestório das minhocas *E. Fetida*, metabolizando o cromo. Atualmente, não é possível saber como ocorre esta redução nem tampouco os mecanismos que elucidem o funcionamento desta reação. Porém, está claro que, além das minhocas desempenharem um papel importante nos ciclos de MO, também interferem e modificam o destino de xenobióticos no ambiente terrestre (Nunes et al., 2016; Arillo e Melodia, 1991).

Scaglia, Tambone e Adani (2013) demonstraram que os HAs possuem grande capacidade de reduzir o Cr (VI). Para isso, extraíram-se os HAs de diferentes resíduos organo-domésticos. Os autores relacionaram a bioatividade dos HAs à presença de grupos metóxi, fenol-metil etc. Uma vez que a vermicompostagem aumenta o teor de HAs, é provável que a bioconversão também ocorra em função destes grupos químicos.

Os resultados de Arillo e Melodia (1991) mostram que o simples contato entre o íon metálico e a pele das minhocas é suficiente para causar a redução do Cr (VI) a Cr (III). Segundo os autores, o muco da epiderme das minhocas contém moléculas (grupos sulfidrilas provavelmente ligados às proteínas) capazes de reduzir o Cr por meio de vias não enzimática. Todas as outras rotas envolveriam atividades metabólicas que se passam no sistema metabólico das minhocas e, também, dos micro-organismos que abitam seu trato digestivo.

Scaglia, Tambone e Adani (2013) observaram uma redução de até $150,00 \mu\text{mol Cr (g HAs)}^{-1}$ ($\mu\text{mol de Cr por grama de vermicomposto}$). Neste estudo, a vermicompostagem promoveu a redução de $15,68 \mu\text{mol Cr (g VRC—L)}^{-1}$, $158,82 \mu\text{mol Cr (g VRC—A)}^{-1}$ e $147,06 \mu\text{mol Cr (g VRC—AL)}^{-1}$ ($\mu\text{mol de Cr por grama de vermicomposto}$).

6. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO I

Os dados apresentados neste primeiro capítulo suportam as seguintes conclusões:

- i. O presente estudo confirma a expectativa de que vermicompostagem é uma tecnologia viável para o tratamento de resíduos industriais provenientes da indústria de couro (curtumes);
 - ii. Em comparação com a amostra controle (VRC—STD), os vermicompostos produzidos a partir de resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL) apresentam melhores características no que se refere aos atributos relacionados à fertilidade agrícola;
 - iii. Nas condições aplicadas neste estudo, os resultados de pH, TOC e o teor de MO diminuem seus valores durante a vermicompostagem. Já os teores de N e a CTC tendem a aumentar seus valores. Ambas as tendências indicam o êxito da vermicompostagem como um processo biológico avançado no tratamento dos resíduos de curtume;
 - iv. As minhocas *E. fetida* se adaptam ao meio vermicompostor, ganhando peso e comprimento (tamanho) durante o processo de vermicompostagem, principalmente nos tratamentos que contém resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL);
 - v. A vermicompostagem da amostra VRC—AL indicou a possibilidade do processamento conjunto de ambos os resíduos, lodo de curtume e aparas curtidas de couro wet-blue;
 - vi. A vermicompostagem, nas condições aplicadas neste estudo, é eficiente na redução (bioconversão) do Cr (VI) presente nos resíduos de curtume, reduzindo-o a Cr (III), a uma concentração de até 158,82 $\mu\text{mol Cr (g VRC—A)}^{-1}$ ($\mu\text{mol de cromo por grama de vermicomposto}$); e
 - vii. Ao todo, este estudo reforça o conceito geral de que a vermicompostagem pode ser apresentada como uma tecnologia eficaz aplicada no tratamento de resíduos de curtume e consequente produção de insumos agrícolas.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERLEY, D. F.; GONZALEZ, C. F.; KEYHAN, M.; BLAKE, R.; MATIN, A. Mechanism of chromate reduction by the *Escherichia coli* protein, NfsA, and the role of different chromate reductases in minimizing oxidative stress during chromate reduction. **Environmental Microbiology**, v. 6, n. 8, p. 851–860, 2004.
- ADANI, F.; GENEVINI, P. L.; GASPERI, F.; TAMBONE, F. Composting and humification. **Compost Science & Utilization**, v. 7, n. 1, p. 24–33, 1999.
- AGRO-CIM. **Brasil deverá manter 2º lugar mundial na produção de couros, depois da China**. Lavras, 2016. Disponível em: <<http://www.agrocim.com.br/noticia/Brasil-devera-manter-2o-lugar-mundial-na-producao-de-couros-depois-da-China.html>>. Acesso em: 01 jan. 2017.
- ALVAREZ-BERNAL, D.; CONTRERAS-RAMOS, S. M.; TRUJILLO-TAPIA, N.; OLALDE-PORTUGAL, V.; FRÍAS-HERNÁNDEZ, J. T.; DENDOOVEN, L. Effects of tanneries wastewater on chemical and biological soil characteristics. **Applied Soil Ecology**, v. 33, n. 3, p. 269–277, 2006.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R.; CARVALHO, E. M. S. Effect of composted textile sludge on growth, nodulation and nitrogen fixation of soybean and cowpea. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 5, p. 1028–32, 2007.
- ARILLO, A.; MELODIA, F. Reduction of hexavalent chromium by the earthworm *Eisenia foetida* (Savigny). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 21, n. 1, p. 92–100, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13591**: compostagem. Rio de Janeiro, 1996. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- BARAJAS-ACEVES, M.; DENDOOVEN, L. Nitrogen, carbon and phosphorus mineralization in soils from semi-arid highlands of central Mexico amended with tannery sludge. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 2, p. 121–30, 2001.
- BERNAI, M. P.; PAREDES, C.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; CEGARRA, J. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. **Bioresource Technology**, v. 63, p. 91–99, 1998.
- BIDONE, F. R. **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais**: eliminação e valorização. Rio de Janeiro: ABES, 2001.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução 357 de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 de março de 2005. Seção 53, p. 58.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução 430 de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, Brasília, 16 de maio de 2011. Seção 92, p. 89.
- CANELLAS, L. P.; GURIDI, F.; SANTOS, G. A. DE A.; RUMJANEK, V. M.; BRAZ-FILHO, R. Aumento da resolução de espectros de RMN ¹³C de ácidos húmicos em solução através do tratamento prévio com KCl 0,03 mol L⁻¹. **Química Nova**, v. 24, n. 1, p. 131–132, 2001.
-

- CAVALLET, L. E.; SELBACH, P. A. Populações microbianas em solo agrícola sob aplicação de lodos de curtume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2863–2869, 2008.
- CHEFETZ, B.; HATCHER, P. G.; HADAR, Y.; CHEN, Y. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, p. 776–785, 1996.
- CHIBA, M. K.; CAMARGO, O. A. DE. Parâmetros de Fertilidade do Solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 427–448.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Curtumes**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2005. 76 p.
- D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 3. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370 p.
- ELVIRA, C.; GOICOECHEA, M.; SAMPDRO, L.; MATO, S.; NOGALES, R. Bioconversion of solid paper-pulp mill sludge by earthworms. **Bioresource Technology**, v. 75, n. 1, p. 173–177, 1996.
- EPSTEIN, E. **The science of composting**. Lancaster: Technomic, 1997. 225 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (UN-FAO). **World statistical compendium for raw hides and skins, leather and leather footwear 1993-2012**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013. 193 p.
- HU, E.; LIU, H. Qualitative analysis of the stability of a continuous vermicomposting system. **Bioresource Technology**, v. 126, n. 1, p. 345–349, 2012.
- KAUR, A.; SINGH, J.; VIG, A. P.; DHALIWAL, S. S.; RUP, P. J. Cocomposting with and without *Eisenia fetida* for conversion of toxic paper mill sludge to a soil conditioner. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 21, p. 8192–8198, 2010.
- KAUSHIK, P.; GARG, V. K. Vermicomposting of mixed solid textile mill sludge and cow dung with the epigeic earthworm *Eisenia foetida*. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 3, p. 311–316, 2003.
- KHAN, A. G. Relationships between chromium biomagnification ratio, accumulation factor, and mycorrhizae in plants growing on tannery effluent-polluted soil. **Environment International**, v. 26, p. 417–423, 2001.
- KONRAD, E. E.; CASTILHOS, D. Alterações químicas do solo e crescimento do milho decorrentes da adição de lodo de cortume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 257–265, 2002.
- KONRAD, E. E.; CASTILHOS, D. D. Atividade microbiana em um Planossolo após a adição de resíduos de curtume. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 7, n. 1, p. 131–135, 2001.
- LANDGRAF, M. D.; MESSIAS, R. A.; REZENDE, M. O. O. **A importância ambiental da vermicompostagem: vantagens e aplicações**. São Carlos: Rima, 2005. 106 p.
- LEE, K. E. **Earthworms: their ecology and relationships with soil and land use**. Londres: Academic Press, 1985. 411 p.
- LOURENÇO, N. **Manual de vermicompostagem e vermicultura para a agricultura orgânica**. Porto: Publindustria, 2014. 230 p.
-

- MELO, G. M. P.; MELO, V. P.; BERTIPAGLIA, L. M. A. Introdução às práticas agrícolas. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 399–423.
- MUNN, K. J.; EVANS, J.; CHALK, P. M. Mineralization of soil and legume nitrogen in soils treated with metal-contaminated sewage sludge. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2031–2043, 2000.
- NDEGWA, P. M.; THOMPSON, S. A. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. **Bioresource Technology**, v. 75, p. 7–12, 2000.
- NDEGWA, P. M.; THOMPSON, S. A.; DAS, K. C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. **Bioresource Technology**, v. 71, n. 1, p. 5–12, 2000.
- NUNES, R. R.; BONTEMPI, R. M.; MENDONÇA, G.; GALETTI, G.; REZENDE, M. O. O. Vermicomposting as an advanced biological treatment for industrial waste from the leather industry (tanneries). **Journal of Environment Science and Health, Part B**, v. 51, n. 5, p. 271–277, 2016.
- ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. DE. Compostagem da fração sólida da água residuária de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 483–491, 2009.
- PIGATIN, L. B. F.; MENDES, L. A.; BENETTI, F. Vermicompostagem. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 660–679.
- PLAZA, C.; NOGALES, R.; SENESI, N.; BENITEZ, E.; POLO, A. Organic matter humification by vermicomposting of cattle manure alone and mixed with two-phase olive pomace. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 1, p. 5085–5089, 2008.
- PROVENZANO, M. R.; OLIVEIRA, S. C.; SILVA, M. R. S.; SENESI, N. Assessment of maturity degree of composts from domestic solid wastes by fluorescence and fourier transform infrared spectroscopies. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, p. 5874–5879, 2001.
- RAMESH, P.; PANWAR, N. R.; SINGH, A. B.; RAMANA, S.; RAO, A. S. Impact of organic-manure combinations on the productivity and soil quality in different cropping systems in central India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 4, p. 577–585, 2009.
- RAMESH, P.; SINGH, M.; PANWAR, N. R.; SINGH, A. B.; RAMANA, S. Response of pigeonpea varieties to organic manures and their influence on fertility and enzyme activity of soil. **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 76, n. 1, p. 252–254, 2006.
- RAVINDRAN, B.; DINESH, S. L.; KENNEDY, L. J.; SEKARAN, G. Vermicomposting of solid waste generated from leather industries using epigeic earthworm *Eisenia foetida*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 151, n. 2–3, p. 480–488, 2008.
- RICCI, M. S. F. **Manual de vermicompostagem**. Porto Velho: EMBRAPA Rondônia, 1996. 25 p.
- SANTOS, J. A.; SANTOS, V. B. DOS; ARAÚJO, A. S. F. DE. Alterações na atividade microbiana e na matéria orgânica do solo após aplicação de lodo de esgoto. **Bioscience Journal**, v. 25, n. 2, p. 17–23, 2009.
- SCAGLIA, B.; TAMBONE, F.; ADANI, F. Cr (VI) reduction capability of humic acid extracted from the organic component of municipal solid waste. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n. 3, p. 487–494, 2013.
-

SCHALCH, V.; MASSUKADO, L. M.; BIANCO, C. I. Compostagem. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 233–656.

SELBACH, P. A.; TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. Descarte e biodegradação de lodo de curtume no solo. **Revista Couro**, v. 4, n. 1, p. 51–62, 1991.

SEN, B.; CHANDRA, T. S. Chemolytic and solid-state spectroscopic evaluation of organic matter transformation during vermicomposting of sugar industry wastes. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 8, p. 1680–1683, 2007.

SINGH, D.; SUTHAR, S. Vermicomposting of herbal pharmaceutical industry waste: Earthworm growth, plant-available nutrient and microbial quality of end materials. **Bioresource Technology**, v. 112, p. 179–185, 2012.

SINGH, R. P.; SINGH, P.; ARAUJO, A. S. F.; HAKIMI IBRAHIM, M.; SULAIMAN, O. Management of urban solid waste: vermicomposting a sustainable option. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 7, p. 719–729, 2011.

SYRIAT, Z. B.; IBRAHIM, M. H.; ASTIMAR, A. A.; HAYAWIN, Z. N. Studies on vermicompost production of palm oil mill effluent sludge using *Eudrillus eugeniae*. **International Interdisciplinary Research Journal**, v. 3, n. 5, p. 42–50, 2013.

VIG, A. P.; SINGH, J.; WANI, S. H.; SINGH DHALIWAL, S. Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* (Savigny). **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 7941–7945, 2011.

WONG, J. W. C.; LEE, D. J.; NAIR, J.; GARG, V. K.; SUTHAR, S.; YADAV, A. Management of food industry waste employing vermicomposting technology. **Bioresource Technology**, v. 126, n. 1, p. 437–443, 2012.

YADAV, A.; GARG, V. K. Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 2874–80, 2011.

CAPÍTULO II

ATIVIDADE HORMONO-SIMILAR DOS VERMICOMPOSTOS

INVESTIGANDO MOLÉCULAS ORGÂNICAS RESPONSÁVEIS PELA ATIVIDADE
AUXINO-SIMILAR DA MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA (DOM)
E DOS ÁCIDOS HÚMICOS (HAs) EXTRAÍDOS DE VERMICOMPOSTOS

Tre cose ci sono rimaste del paradiso: le stelle, i fiori e i bambini

Dante Alighieri

RESUMO DO CAPÍTULO II

NUNES, Ramom Rachide. Capítulo II — Atividade hormono-similar dos vermicompostos: investigando moléculas orgânicas responsáveis pela atividade auxino-similar dos ácidos húmicos (HAs) e da matéria orgânica dissolvida (DOM) extraídos de vermicompostos. In: Vermicompostagem como tecnologia aplicada à valorização e reaproveitamento dos resíduos de curtume: um estudo químico e agrônômico com vistas à produção orgânica de pimentão em ambiente protegido. Tese (Doutorado em Química). Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. 2016. p. 91-163.

Neste capítulo, duas frações orgânicas extraídas dos vermicompostos — matéria orgânica dissolvida (DOM) e ácidos húmicos (HAs) — foram avaliadas a fim de investigar seu potencial hormono-similar em testes de germinação com sementes de alface, *Lactuca sativa*. Os vermicompostos foram classificados em função de seu estágio de maturação — frescos, estáveis e maduros — e diferentes concentrações de seus extratos foram analisadas, de 100,0 a 6000,0 mg C L⁻¹ para os HAs e de 0,1 a 4000,0 mg C L⁻¹ para a DOM. Além disso, ¹³C CPMAS-NMR e GC/MS foram as técnicas analíticas aplicadas à avaliação da estrutura química dos extratos orgânicos bioativos. A ação hormonal observada foi o efeito auxino-similar, mensurado pela capacidade dos compostos orgânicos em inibir a germinação das sementes de *L. sativa* durante os bioensaios. Nem todos os extratos e amostras apresentaram efeito auxino-similar. Em geral, os HAs apresentaram-se mais bioativos que a DOM, com efeitos observados muito mais intensos. Os resultados obtidos indicaram que o tempo de vermicompostagem aumentou a ação hormono-similar em decorrência das transformações ocorridas na MO ao longo da vermicompostagem. Os HAs extraídos dos vermicompostos VRC—A foram os que apresentaram melhores resultados, inibindo completamente a germinação das sementes de *L. sativa*. Os espectros de ¹³C CPMAS-NMR indicaram que os HAs são semelhantes, independentemente do tipo de vermicomposto, e indica que os processos de transformação da MO provavelmente promoveram uma concentração dos HAs, sem que houvesse uma modificação drástica na estrutura dos compostos húmicos. Já a técnica de GC/MS permitiu a identificação das moléculas envolvidas na ação auxino-similar, tais como os aminoácidos, ácidos carboxílicos de cadeia aromática e alifática, hidroxiácidos, poliálcoois e monossacarídeos. Em geral, as amostras com maiores concentrações de aminoácidos e ácidos carboxílicos foram as mais bioativas. A concentração limite, a partir da qual os HAs são bioativos, é 96,02 µg g⁻¹ (µg de composto orgânico bioativo por g de vermicomposto), referente ao valor mais alto de um composto bioativo em uma amostra sem atividade hormono-similar. Conforme citado desde o Capítulo I, a qualidade dos vermicompostos varia em função dos aspectos químicos e agrônômicos de cada amostra. Os dados apresentados nesse capítulo corroboram com os dados apresentados no Capítulo I. Os vermicompostos de melhor qualidade são, também, os que apresentam melhores resultados nos testes de germinação.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	99
1.1.	A atividade hormonal nos organismos vegetais	99
1.1.1.	Conceito clássico	99
1.1.2.	Conceito botânico	100
1.1.3.	Conceito integrativo	100
1.2.	Os hormônios vegetais	101
1.2.1.	Auxinas e o ácido indol-3-acético (AIA)	102
1.2.2.	O efeito hormono-similar	103
1.3.	A matéria orgânica e suas frações	104
1.3.1.	Ácidos húmicos (HAs)	107
1.3.2.	Matéria orgânica dissolvida (DOM)	109
2.	OBJETIVOS DO CAPÍTULO II	111
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	112
3.1.	Os vermicompostos e seus estágios de maturação	112
3.2.	HAs	112
3.3.	DOM	113
3.4.	Testes de germinação	113
3.4.1.	Sementes de <i>L. sativa</i>	113
3.4.2.	Bioensaios	113
3.4.3.	Tratamento estatístico dos dados	116
3.5.	Caracterização dos extratos bioativos	116
3.5.1.	¹³ C CPMAS-NMR	116
3.5.2.	GC/MS	117
4.	RESULTADOS	118
4.1.	HAs e DOM nos vermicompostos	118
4.2.	Atividade hormono-similar — Efeito auxino-similar	119
4.2.1.	Bioatividade dos HAs	119
4.2.2.	Bioatividade da DOM	126
4.2.3.	Bioatividade do AIA	133
4.3.	¹³ C CPMAS-NMR	135
4.4.	GC/MS	141
5.	DISCUSSÃO	154
5.1.	Testes de germinação e bioatividade	154
5.2.	Caracterização dos HAs	155
6.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO II	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — II.	Estrutura do ácido indol-3-acético (AIA)	102
Figura 2 — II.	Síntese do ácido indol-3-acético (AIA) a partir do triptofano.....	103
Figura 3 — II.	Principais vias para a formação das substâncias húmicas.....	106
Figura 4 — II.	Estrutura macromolecular do ácido húmico.....	107
Figura 5 — II.	Bioensaios com <i>L. sativa</i> para avaliação da atividade hormono-similar da DOM e HAs extraídos dos vermicompostos.....	115
Figura 6 — II.	Germinação da semente de <i>L. sativa</i> e desenvolvimento de seu hipocotilo e rizoma (raíz).....	116
Figura 7 — II.	Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com os HAs bioativos extraídos de vermicompostos em diferentes estágios de maturação, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	124
Figura 8 — II.	Testes de germinação com os HAs extraídos do vermicomposto VRC—A (amostra HA—A—M) em diferentes concentrações, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	125
Figura 9 — II.	Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com a DOM bioativa extraída de vermicompostos em diferentes estágios de maturação, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	131
Figura 10 — II.	Testes de germinação com a DOM extraída do vermicomposto VRC—A (réplica aleatória da amostra DOM—A—M) em diferentes concentrações, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	132
Figura 11 — II.	Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com AIA, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	133
Figura 12 — II.	Testes de germinação com AIA em diferentes concentrações, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	134
Figura 13 — II.	Espectros de ¹³ C CPMAS-NMR dos HAs extraídos dos vermicompostos VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo.....	140
Figura 14 — II.	Concentrações das classes de compostos orgânicos determinados nos HAs de vermicompostos, em diferentes estágios de maturação, via GC/MS.....	152
Figura 15 — II.	Concentrações das classes de compostos orgânicos determinados nos HAs com bioatividade via GC/MS.	153
Figura 16 — II.	Concentrações das classes de compostos orgânicos determinados nos HAs sem bioatividade via GC/MS.	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — II.	Teor de HAs nos vermicompostos VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL em diferentes estágios de maturação e, também, teor de C da DOM e dos HAs.	118
Tabela 2 — II.	Atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) observado nos bioensaios com os HAs extraídos de diferentes vermicompostos (VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL) nos estágios de maturação fresco, estável e maturo, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	120
Tabela 3 — II.	Índice de crescimento (LI) das raízes de <i>L. sativa</i> sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e de HAs extraídos de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte I: amostras VRC—STD e VRC—L.	121
Tabela 4 — II.	Índice de crescimento (LI) das raízes de <i>L. sativa</i> sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e de HAs extraídos de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte I: amostras VRC—A e VRC—AL.	122
Tabela 5 — II.	Atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) observado nos bioensaios com a DOM extraída de diferentes vermicompostos (VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL) nos estágios de maturação fresco, estável e maturo, utilizando sementes de <i>L. sativa</i>	126
Tabela 6 — II.	Índice de crescimento (LI) das raízes de <i>L. sativa</i> sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e da DOM extraída de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte I: amostras VRC—STD e VRC—L.	128
Tabela 7 — II.	Índice de crescimento (LI) das raízes de <i>L. sativa</i> sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e da DOM extraída de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte II: amostras VRC—A e VRC—AL.	129
Tabela 8 — II.	Áreas integradas dos picos obtidos por ¹³ C CPMAS-NMR dos HAs extraídos de diferentes vermicompostos nos estágios de maturação fresco, estável e maturo.	136
Tabela 9 — II.	Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte I: Amostras HA—STD, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em µg g ⁻¹ (µg de composto por g de HAs).	142
Tabela 10 — II.	Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte II: Amostras HA—L, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em µg g ⁻¹ (µg de composto por g de HAs).	144
Tabela 11 — II.	Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte III: Amostras HA—A, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em µg g ⁻¹ (µg de composto por g de HAs).	146
Tabela 12 — II.	Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte IV: Amostras HA—AL, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média ± DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em µg g ⁻¹ (µg de composto por g de HAs).	148

1. INTRODUÇÃO

1.1. A atividade hormonal nos organismos vegetais

Palavra de origem grega, o termo 'hormônio' significa 'estimular' ou 'despertar' e designa um conjunto de moléculas que têm como principal função a regulação das funções biológicas nos seres vivos. Se tratando dos hormônios vegetais, seu entendimento é essencial para a compreensão do funcionamento das funções vitais de uma planta, tais como seu crescimento, desenvolvimento, floração, produção de frutos etc. (Taiz e Zeiger, 2013; Raven et al., 2007; Poulakou-Rebelakou et al., 2005).

Assim como ocorre com os demais seres vivos, o desenvolvimento das plantas é regulado por numerosas vias metabólicas que ocorrem naturalmente nas células e tecidos dos organismos vegetais. Assim, desde a germinação das sementes até a planta adulta, todo o seu crescimento é regulado por certas substâncias químicas, tais como os hormônios e certas enzimas (Taiz e Zeiger, 2013; Raven et al., 2007; Osborne e McManus, 2005).

Em geral, o efeito de um hormônio vegetal está relacionado a quatro pontos principais, a saber:

- i.* Concentração do hormônio;
- ii.* Estágio de desenvolvimento da planta;
- iii.* Sensibilidade diferencial; e
- iv.* Interação com outros hormônios.

Neste estudo, dentre estes quatro pontos principais, a concentração do hormônio (*i.*) é o parâmetro mais importante, e é o foco deste estudo, se relacionando diretamente à metodologia adotada.

Pontuando cada item, individualmente, a concentração hormonal está relacionada ao tipo de tecido em que o hormônio é produzido, resultando em diferentes moléculas com funções e quantidades diversas. No que se refere à concentração, a ação hormonal é efetiva para uma faixa ótima, abaixo desta não há resposta fisiológica e, acima, o hormônio apresenta um efeito inibitório e tóxico, nocivo às células vegetais. Em geral, os hormônios vegetais atuam em concentrações bastante baixas, próximas a $1,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Raven et al., 2007; Ferri, 1981).

Ao longo deste estudo, a técnica utilizada para determinação de moléculas com potencial hormonal se baseou na super-dosagem de compostos hormono-ativos. Desta forma, operando acima da faixa de concentração ótima, é possível evidenciar a presença de hormônios vegetais ou moléculas com efeitos similares (Scaglia et al., 2015; Korasick et al., 2013; Wang et al., 2001).

Além disso, o estágio de desenvolvimento da planta está relacionado ao crescimento da espécie vegetal e a formação de seus tecidos e órgãos (*ii.*). Por fim, os dois últimos pontos (*iii.* e *iv.*) são os principais determinantes da especificidade do hormônio vegetal, e estão relacionados aos mecanismos e vias metabólicas da ação hormonal, que não é o foco deste trabalho (Taiz e Zeiger, 2013; Raven et al., 2007; Osborne e McManus, 2005).

Em geral, diversos conceitos tentaram classificar e explicar a função dos hormônios nos organismos vivos. São eles: o conceito clássico, o conceito botânico e o conceito integrativo.

1.1.1. Conceito clássico

Em 1905, o médico Ernest Henry Starling descobriu a secretina e, logo, os hormônios. Assim, Starling classificou-os da seguinte forma (Poulakou-Rebelakou et al., 2005):

“Hormônios são substâncias orgânicas sintetizadas em um órgão específico do organismo e transportadas a outro. Em concentrações muito baixas poderão causar alguma resposta fisiológica ou alguma alteração no metabolismo ou padrão fisiológico do organismo.”

Embora seja válido, este conceito é generalista e apresenta falhas ao englobar os organismos vegetais e animais. Nas plantas, os hormônios são produzidos em quase todos os tecidos, não se limitando a um único e específico. Já nos animais, cada hormônio é produzido apenas por certos órgãos ou tecidos. Além disso, nos animais, os hormônios são transportados para diversos locais do corpo por meio de sistemas, como o sanguíneo e o linfático. Já nas plantas, a distribuição dos hormônios é mais diversificada, visto que estas substâncias podem ser consumidas no mesmo local de síntese ou ainda serem transportadas, via sistema vascular ou célula a célula (Osborne e McManus, 2005; Kerbauy, 2004; Ferri, 1981).

1.1.2. Conceito botânico

O conceito botânico evidencia o papel dos hormônios como mensageiros químicos na comunicação entre células, tecidos e órgãos das plantas superiores. O uso do termo hormônio com abordagem às plantas surgiu em 1909, quando Fitting utilizou o termo hormônio para designar a senescência induzida durante a fertilização da flor de orquídea. Contudo, o termo só se consolidou a partir dos estudos sobre o fototropismo, os quais levaram à descoberta das auxinas — importante classe de hormônios vegetais (Kucera et al., 2005; Poulakou-Rebelakou et al., 2005).

Porém, antes mesmo das definições do conceito clássico, o botânico alemão Julius von Sachs (1832-1897) já estudava a produção de substâncias orgânicas pelas células vegetais, as quais seriam as responsáveis pelo desenvolvimento das raízes, flores etc. (Kucera et al., 2005).

1.1.3. Conceito integrativo

Diversos estudos já comprovaram que cada hormônio vegetal é singular em estrutura e composição. Contudo, o desenvolvimento normal de uma planta não é uma resposta de apenas um binômio *hormônio vs efeito fisiológico*, mas sim, de um conjunto integrado de sinais endógenos ou ambientais, incluindo efeitos cruzados de múltiplos hormônios (Davies, 2007; Kucera et al., 2005; Osborne e McManus, 2005). Embora a ação hormonal seja algo complexo, podemos citar três tipos de interações decorrentes da atividade hormonal:

- i. Cada hormônio pode causar efeitos variados em diferentes tecidos ou órgãos de uma mesma espécie ou de diferentes espécies;
- ii. Diferentes hormônios podem causar um mesmo tipo de resposta no mesmo tecido ou órgão e
- iii. Dois ou mais hormônios podem interagir entre si, criando um efeito sinérgico, o qual resulta em uma resposta fisiológica específica, formando uma extensa e complexa rede hormonal.

Para se adequar essas três inter-relações à definição de ‘hormônio vegetal’, é necessário adotar um novo conceito, o qual abranja esta nova forma de olhar sob a fisiologia vegetal. Neste novo conceito, os hormônios vegetais podem ser classificados da seguinte forma (Davies, 2007; Kucera et al., 2005; Osborne e McManus, 2005):

“Hormônios são substâncias químicas que atuam de forma integrada na regulação dos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, operando coordenadamente para manutenção da homeostase vegetal.”¹

O conceito adotado neste trabalho será o integrativo, tendo em vista que este modelo é o que melhor se adequa à forma na qual os hormônios realmente agem no controle e desenvolvimento harmônico de um organismo vegetal.

1.2. Os hormônios vegetais

Conforme citado no item anterior, os hormônios vegetais representam uma vasta variedade de substâncias que desempenham alguma função na regulação hormonal nos organismos vegetais. Uma forma de organiza-los é dividindo-os em classes, de acordo com suas funções e tecidos onde atuam. São elas (Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007; Kerbauy, 2004):

- i. Citocininas;
- ii. Giberelinas e
- iii. Auxinas.

Além disso, dois compostos não representam uma classe, mas são moléculas com ações e funções únicas:

- iv. Etileno e
- v. Ácido abscísico.

Pontuando cada classe, individualmente, as citocininas são hormônios vegetais produzidos nas raízes e transportados para toda a planta por meio de seu sistema vascular ou célula a célula. Em geral, as citocininas auxiliam na diferenciação e divisão das células vegetais, no desenvolvimento das raízes e das gemas laterais, além de atuarem no envelhecimento da planta, retardando-o (Sakakibara, 2006).

Já as giberelinas — hormônios vegetais produzidos nos meristemas, nas folhas jovens e nos frutos — atuam ao estimular o alongamento e a divisão das células vegetais, além de agir na floração e no desenvolvimento das folhas (Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007).

O etileno é um gás produzido em diversas partes da planta e atua, principalmente, no amadurecimento dos frutos, sendo largamente utilizado em processos industriais para a aceleração do ponto de maturação de frutos verdes (Alonso e Ecker, 2001).

O ácido abscísico é produzido nas folhas, no caule e no ápice radicular das plantas, e atua principalmente no desenvolvimento do caule. Além disso, atua em casos de estresse hídrico, fazendo com que a planta diminua sua transpiração, mantendo-a assim hidratada (Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007).

Por último, temos as auxinas, que é a classe de hormônios vegetais mais conhecida e divulgada na literatura. O item a seguir apresenta uma introdução às auxinas e ao ácido indol-3-acético, o AIA.

¹ Homeostase é a capacidade dos organismos vivos de se manterem em um equilíbrio interno estável, mas dinâmico, que permita que os mesmos respondam adequadamente e possam se aclimatizar frente as variações do meio no qual se encontram (Korasick et al., 2013; Sakakibara, 2006).

1.2.1. Auxinas e o ácido indol-3-acético (AIA)

Principal classe de hormônios vegetais, as auxinas são substâncias relacionadas principalmente à regulação do crescimento dos organismos vegetais. Dentre as principais representantes desta classe, destacam-se os ácidos 4-cloroindol-3-acético (4-Cl-AIA), indol-3-butírico (AIB), 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), 2-metoxi-3,6-diclorobenzoico (dicamba) e o indol-3-acético (AIA) (Figura 1 — II), principal auxina nos organismos vegetais (Korasick et al., 2013; Rozov et al., 2013; Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007).

Figura 1 — II. Estrutura do ácido indol-3-acético (AIA).

FONTE: Autoria própria.

Em termos de sua síntese, as auxinas são produzidas nos órgãos vegetais que apresentam rápida divisão celular, principalmente nas partes aéreas das plantas, com destaque para as regiões meristemáticas apicais, folhas jovens e frutos em desenvolvimento. Se tratando do AIA, o precursor de sua molécula é o triptofano que, por meio de quatro rotas distintas, pode levar à sua formação (Figura 2 — II). Dentre estas vias, a via do ácido indol-3-pirúvico (IPA) é a de maior ocorrência, envolvendo a desaminação do triptofano, formando o IPA. Em seguida, após uma sequência de descarboxilação e oxidação leva à formação do AIA (Korasick et al., 2013; Rozov et al., 2013; Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007).

Os efeitos fisiológicos regulados pelas auxinas — e o AIA — são diversos e estão relacionados principalmente aos processos que controlam o crescimento de diferentes órgãos vegetais. Algumas de suas principais funções nas plantas são (Korasick et al., 2013; Rozov et al., 2013; Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007):

- i. Crescimento do caule e raiz: As auxinas atuam no alongamento das células vegetais, promovendo seu crescimento. Caso apresente uma baixa concentração de auxinas, a planta pode apresentar um crescimento normal de sua raiz, porém sem que seu caule se desenvolva. Já em altas concentrações, o efeito observado é o contrário — desenvolve-se mais o caule que a raiz;
- ii. Dominância apical: As auxinas produzidas pelo meristema apical do caule atuam ao diminuir a atividade das gemas axilares, próximas ao ápice. Ao se extrair a gema apical de uma planta ocorre o surgimento de ramos, folhas e flores laterais;
- iii. Tropismo: As auxinas atuam no controle dos tropismos, que são os movimentos relacionados ao crescimento das plantas em resposta a algum estímulo da natureza, por exemplo, o fototropismo — movimento de inclinação das plantas em direção à luz;
- iv. Produção e desenvolvimento de frutos: As auxinas são produzidas nas sementes, as quais auxiliam na formação dos frutos;
- v. Queda de folhas velhas: Ao apresentar baixa concentração de auxinas, as folhas velhas — aquelas formadas há mais tempo — tendem a cair.

Figura 2 — II. Síntese do ácido indol-3-acético (AIA) a partir do triptofano.

FONTE: Adaptado de Taiz e Zeiger (2013)

1.2.2. O efeito hormono-similar

O mecanismo de ação dos hormônios — incluindo os vegetais — se inicia com uma ligação do tipo chave-fechadura. Ou seja, os os hormônios se ligam em sítios específicos — que são os receptores — localizados no citoplasma celular ou no núcleo da célula (Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007).

Conforme apresentado no item anterior, a interação do hormônio com os receptores leva a um efeito fisiológico nos organismos vegetais. Contudo, a regulação das funções biológicas não é exclusiva dos hormônios (Taiz e Zeiger, 2013; Davies, 2007). Enzimas e outros compostos orgânicos podem apresentar ação similar à observada com um hormônio (Scaglia et al., 2015, 2016; Tsavkelova et al., 2006).

Em geral, as moléculas orgânicas que regem quaisquer reações de controle da atividade biológica, tal qual faz um hormônio, são chamados de compostos hormono-similares. Acerca dessas moléculas, temos que (Scaglia et al., 2015, 2016; Ertani et al., 2013; Trevisan et al., 2010; Tsavkelova et al., 2006):

- i. Compostos homono-similares não são hormônios, pois não são produzidos pelo próprio organismo vegetal;
- ii. Estes compostos possuem atividade reguladora, tal qual um hormônio, atuando em pequenas concentrações;
- iii. Uma vez que estes compostos não são sintetizados nas plantas, suas moléculas precisam ser absorvidas pelas raízes das plantas, e são transportadas pelo tecido vascular ou célula a célula, nos organismos vegetais;

- iv. Em geral, estes compostos são oriundos da matéria orgânica do solo (MO) e suas frações, tais como os ácidos húmicos (HAS) e a matéria orgânica dissolvida (DOM);

Diversos estudos vêm demonstrando o efeito da MO e suas frações no estímulo de plantas, desde a germinação até seu crescimento, desenvolvimento e produção de frutos. Os primeiros trabalhos foram publicados por Hopp e Slater (1949), seguidos por Van Rhee (1965). Em ambos os casos foi observado um efeito positivo da ação do húmus de minhoca — tal qual fizemos neste estudo — no desenvolvimento de culturas de trigo. No ano seguinte, Stockdill e Cossens (1966) observaram o mesmo efeito no crescimento de grama silvestre em áreas de pastagem em decorrência da adição de MO ao solo. Com o tempo, outros trabalhos foram desenvolvidos e novas observações realizadas. Contudo, devido às limitações tecnológicas, todo efeito observado ainda era limitado às análises biométricas e químicas rudimentares (Tomati et al., 1985).

O efeito hormono-similar foi atribuído à ação bioestimulante da MO apenas nos anos de 1980, com os trabalhos de Edwards. Nestes estudos ficou comprovada a presença de substâncias reguladoras do crescimento, uma vez que diversos compostos orgânicos puderam ser isolados e avaliados semi-quantitativamente (Tomati et al., 1985; Edwards, 1980, 1983).

Com o passar dos anos, o avanço das técnicas espectroscópicas e o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à análise de compostos orgânicos, vieram os questionamentos quanto à estrutura da MO, das SH e, em específico, dos HAS — que será melhor abordado no item 1.3.1. Já no final dos anos 80 e início de 1990, a busca pela estrutura dos HAS, da química à física molecular, trouxe à luz da ciência quais componentes faziam parte da estrutura da MO e dos HAS. Assim, diversos pesquisadores iniciaram seus estudos a fim de investigar quais moléculas ou grupos de moléculas seriam responsáveis pela ação hormono-similar. Além disso, em alguns estudos foram publicados dados com as frações da MO isoladas, tais como a DOM, HAS, entre outras.

Os pesquisadores Dell'Agnola e Nardi, em 1987, evidenciaram que as frações húmicas obtidas a partir de vermicompostos aumentaram a sorção de nitratos em culturas de aveia, promovendo um maior desenvolvimento das plantas, porém, sem evidenciar quais moléculas apresentaram atividade hormono-similar (Dell'Agnola e Nardi, 1987). Já em 1992, complementando diversos estudos já publicados, Piccolo, Nardi e Concheri divulgaram o primeiro estudo em que se relacionavam, de fato, os componentes moleculares das substâncias húmicas à regulação do crescimento dos organismos vegetais (Piccolo et al., 1992). Com o passar dos anos diversos pesquisadores seguiram naquela linha de pesquisa e investigação, com novos trabalhos e estudos publicados na literatura.

A consolidação desses estudos veio em 2002 com Nardi et al. (2002), comprovando diversos dados e estudos já publicados na literatura. Nesse trabalho foi investigada a ampla ação hormono-similar no desenvolvimento de plantas de tabaco, *Nicotiana plumbaginifolia*. Foram investigadas as frações húmicas de diferentes fontes, concentrações, solubilidade e massas moleculares.

Em geral, além de investigar o efeito hormono-similar de compostos orgânicos provenientes da MO, indiferente de sua fonte e origem, esses estudos tiveram como objetivo agregar valor à MO, além de apresentar mais argumentos para o uso de insumos orgânicos na agricultura ou quaisquer práticas agrícolas, quando aplicável.

Conforme citado neste item, algumas moléculas orgânicas podem apresentar ação similar à resposta biológica observada em decorrência da ação de um hormônio. Destaca-se a MO e suas frações, DOM e HAS, as quais serão introduzidas no item a seguir.

1.3. A matéria orgânica e suas frações

A MO — constituinte natural dos solos, turfas, sedimentos e águas naturais — apresenta-se como um sistema complexo de substâncias de natureza diversa, cuja transformação contínua por agentes químicos, físicos e biológicos resulta

em um material que, mesmo após centenas de anos de estudos, provoca discordância quanto às suas características (Tan, 1994, 1998; Sposito, 1989).

O termo MO designa um conjunto de compostos orgânicos provenientes da decomposição de organismos vegetais e animais, além de seus resíduos (fezes, excreções etc.) e produtos de transformação parcial, os quais envolvem diversos processos relacionados ao ciclo de vida dos seres vivos (Landgraf et al., 2005).

Estes processos de transformação envolvem vários estágios de decomposição dos organismos mortos, resultantes da degradação química, biológica e da atividade sintética dos micro-organismos. Além disso, a MO é uma fonte de energia e nutrientes para os organismos que participam de seu ciclo biológico. Se tratando do solo, a MO é capaz de mante-lo em um estado dinâmico, exercendo importante papel em sua fertilidade (Essington, 2004; Landgraf et al., 1998; Tan, 1994, 1998).

Em função do quão transformada é, a MO pode ser classificada em duas classes distintas (Cunha et al., 2015; Pigatin et al., 2015; Landgraf et al., 2005; Santos e Camargo, 1999; Stevenson, 1994):

- i. Substâncias não-húmicas: constitui-se, principalmente, pelos compostos liberados ao longo dos processos de decomposição da MO, a qual é recente (quanto a sua reposição no solo) e pouco modificada. A despeito da grande variedade de moléculas que a constitui, diversas estruturas orgânicas são passíveis de detecção, tais como os carboidratos, aminoácidos, proteínas, lipídeos, ácidos nucleicos, ligninas e ácidos orgânicos; e
- ii. Substâncias húmicas: inclui os ácidos húmicos (HAs), ácidos fúlvicos (HFs), ácidos himatomelânicos e huminas. Sua origem deriva principalmente da interpolimerização de compostos fenólicos, peptídeos, aminoácidos e carboidratos, provenientes da MO que se encontra há mais tempo sobre a cobertura do solo, suscetível à ação de agentes químicos, físicos e biológicos.

Nos solos, a MO rege diversos processos pedogenéticos e interfere nos fenômenos geoquímicos e nas propriedades físico-químicas do solo. Em condições naturais, a MO rege o equilíbrio entre o solo, a vegetação e os animais que fornecem os resíduos orgânicos (Landgraf et al., 2005; Rocha e Rosa, 2003; Santos e Camargo, 1999).

Com o tempo, a MO depositada sobre o solo tende a se estabilizar. Nesse processo, os compostos orgânicos transformam-se em compostos mais estáveis — ricos em ligações duplas conjugadas e anéis aromáticos — que são parcialmente e constantemente transformados em substâncias húmicas (SH) (Nunes et al., 2014; Canellas e Santos, 2005; Stevenson, 1994).

As SH são moléculas relativamente estáveis e importantes para a manutenção e melhoria na fertilidade e qualidade do solo. Além disso, as SH são arbitrariamente classificadas em função da solubilidade de seus constituintes em solução aquosa de pH controlado: HAs são solúveis em meios alcalinos ($\text{pH} \approx 8$) e os HFs em meios ácidos ($\text{pH} \approx 2$) (Canellas e Santos, 2005; Adani et al., 1999; Stevenson, 1994).

Proveniente da MO fresca, as SH podem ser formadas por quatro mecanismos principais (Figura 3 — II), a saber:

- i. Via dos açúcares;
- ii. Via dos polifenóis;
- iii. Via dos produtos de degradação da lignina; e
- iv. Via das ligninas modificadas;

Não se sabe ao certo como as SH são formadas. Contudo, estes mecanismos são vias hipotéticas que se destacaram pela notoriedade dos resultados obtidos e divulgados na literatura (Stevenson, 1994). Em geral, estes mecanismos concordam que o principal processo para a formação das SH se dá por meio da oxidação de substratos hidrolisados monoméricos. Estas moléculas conduziriam a formação de suspensões moleculares de elevada massa molecular (Pigatin et al., 2015; Stevenson, 1994; Schulten e Schnitzer, 1993).

Figura 3 — II. Principais vias para a formação das substâncias húmicas.

FONTE: Adaptado de Stevenson (1994)

O mecanismo 1 (via dos açúcares) propõe a formação das SH a partir da polimerização não enzimática por meio da condensação entre aminoácidos e açúcares. Esta teoria considera que as SH são produtos da reação exclusivamente química entre açúcares redutores e aminoácidos, originados da atividade microbiana. Devido a rápida assimilação biológica dos açúcares, o mecanismo 1 ocorreria principalmente em solos de baixa atividade biológica, por exemplo, regiões desérticas (Stevenson, 1994).

No mecanismo 4 as substâncias húmicas seriam derivadas de ligninas modificadas. A lignina — constituinte natural dos tecidos vegetais — é um biopolímero de estrutura complexa, formada pela combinação de unidades de fenilpropanóides (álcoois coniferílico, cumárico e sinapílico) com outras subunidades, tais como éter guaiacilglicerol-β-coniferílico, álcool diidroconiferílico, pinorresinol, entre outros. A via das ligninas ocorre predominantemente em solos mal drenados ou em áreas hidromórficas, enquanto que a síntese das SH a partir de polifenóis pode ocorrer mais facilmente em solos típicos de florestas (Stevenson, 1994).

Já nos mecanismos 2 e 3, a formação das SH envolve a participação de quinonas — ambas representam a teoria macromolecular, mecanismo pioneiro ao elucidar a forma estrutural dos HAs.² No mecanismo 2, os polifenóis teriam origem nos carbonos de origem não-lignínicos e seriam sintetizados por microrganismos específicos. Já no mecanismo 3, a fonte de polifenóis seria a própria lignina. Neste mecanismo, os aldeídos e ácidos fenólicos, originados a partir da degradação parcial do biopolímero, poderiam reagir entre si — ou com outras moléculas orgânicas, tais como os subprodutos de degradação —

² Nesta teoria, os HAs — principal SH — seria uma única molécula, formada a partir da condensação de grupos aromáticos (fenóis, quinonas etc). Esta teoria foi substituída pela teoria supramolecular, que é a hipótese aceita pela maioria dos pesquisadores da atualidade (Piccolo, 2001).

dando origem às quinonas. Por sua vez, estas quinonas se condensariam com a amônia e outros compostos nitrogenados, tais como aminoácidos e proteínas, dando origem às SH (Stevenson, 1994).

Os mecanismos baseados na teoria da condensação polimérica de polifenóis e quinonas têm sido os mais aceitos pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS). Contudo, diversos pesquisadores têm divergido quanto a estas teorias. Novos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de elucidar novos mecanismos que expliquem as vias e meios em que se dá a síntese das SH. Hoje, a teoria mais aceita é a hipótese de que as SH seriam formadas de acordo com o modelo supra-molecular.

1.3.1. Ácidos húmicos (HAs)

A química do solo, área que investiga as substâncias húmicas, tem obtido relevantes avanços nas últimas décadas no estudo das SH, em especial dos HAs. Ainda hoje não existe um modelo que contemple totalmente a composição dos HAs, sua estrutura, forma e o tamanho de suas moléculas constituintes, o que gera controvérsias e discussões no que se refere aos estudos publicados (Burdon, 2001; Piccolo, 2001; Stevenson, 1994; Schulten e Schnitzer, 1993).

Schulten e Schnitzer (1993), a partir de técnicas analíticas como a pirólise, métodos espectroscópicos e a microscopia eletrônica etc., sugeriram uma fórmula estrutural para os HAs (Figura 4 — II). Este modelo sugere os HAs seriam uma única macromolécula, formada a partir da condensação de vários compostos menores, provenientes da degradação da MO. Quatro anos depois, Schulten e Schnitzer (1997) aprimoraram esse modelo, elucidando conformações espaciais à macromolécula do HA.

Figura 4 — II. Estrutura macromolecular do ácido húmico.

FONTE: Schulten e Schnitzer (1993).

AUTORIZAÇÃO: 4074290899425 Springer ®.

Com o passar dos anos, novas teorias foram propostas e outros modelos desenvolvidos. Desde o começo dos anos 2000 a teoria mais aceita e estudada é o modelo supramolecular. Esta teoria surgiu com Lehn (1978), ao afirmar que:

“(…) tal como há um campo para a química molecular baseada na ligação covalente, há um campo na química supramolecular, que é a química das associações moleculares e das ligações intermoleculares”

Já em 1996, este conceito foi reformulado e, atualmente, considera-se que:

“A química supramolecular pode ser definida como a química para além da molécula, dedicada às entidades organizadas de maior complexidade que resultam da associação de duas ou mais espécies químicas ligadas por forças intermoleculares”

As estruturas supramoleculares são constituídas por grupos moleculares que interagem e se unem em um sistema chave-fechadura, por meio de ligações seletivas não-covalentes. Assim, forma-se uma supermolécula proveniente das associações supramoleculares, através de um processo de reconhecimento molecular (Lehn, 1996).

De acordo com Lehn (1973), reconhecimento molecular é a energia envolvida na ligação de um ou mais substratos em uma determinada molécula receptora. Este conceito envolve a dupla complementaridade em nível eletrônico e geométrico entre o substrato e o receptor. O reconhecimento por parte de uma molécula receptora em relação a um substrato resulta em uma grande diferença entre a energia livre de ligação desse substrato comparativamente a outros. Para se alcançar grandes diferenças de afinidade é necessário conciliar uma série de fatores como, por exemplo, a complementaridade estereoquímica e de interação entre o substrato e o receptor, além da existência de múltiplos locais de interação e extensas áreas de contacto entre as espécies interatuantes (Lehn, 1973, 1996).

Nesse modelo, as estruturas supramoleculares são formadas em um processo natural e espontâneo, o qual se aplica às SH e aos HAs. Segundo Piccolo (2001), as SH seriam moléculas pequenas e heterogêneas, de várias origens e auto-organizadas em conformações supramoleculares. As superestruturas húmicas não estariam associadas por ligações covalentes. Ao invés disso, suas ligações seriam estabilizadas por forças fracas, tais como interações hidrofóbicas (van der Waals, $\pi-\pi$ e ligações $\text{CH}-\pi$). Além disso, nas organizações húmicas supramoleculares, as forças intermoleculares determinariam a estrutura conformacional das SH, enquanto que as interações múltiplas não-covalentes controlariam sua reatividade.

Desta forma, as definições das diferentes frações húmicas — em especial os HAs e HFs — devem ser revistas (Piccolo, 2001):

- i. Ácidos húmicos (HAs): Substâncias principalmente hidrofóbicas, tais como cadeias polimetilênicas, ácidos graxos e esteroides etc. Suas estruturas são estabilizadas em meio neutro por forças dispersivas hidrofóbicas.
- ii. Ácidos fúlvicos (HFs): São associações de pequenas moléculas hidrófilas, nas quais existe um número suficiente de grupos ácidos que mantêm os clusters, por eles formados, dispersos em soluções de quaisquer valores de pH;

Diversos estudos das associações supramoleculares dos HAs, principalmente por meio de técnicas químicas e espectroscópicas, vêm fornecendo evidências dos microdomínios hidrofóbicos em associações húmicas. Estes resultados confirmaram o conceito de que os HAs são constituídos de associações de estruturas menores, quimicamente afins e compatíveis, além de características químicas semelhantes (Piccolo, 2001; Adani et al., 1997, 1999; Morra et al., 1990).

À luz do modelo supra-molecular, a humificação é considerada um processo em dois passos simultâneos: biodegradação dos componentes celulares e, em seguida, a auto-agregação dos produtos biodegradados (Piccolo, 2001, 2002, Adani et al., 1997, 1999). Nesse modelo, a formação de novas ligações covalentes como sinônimo de grau de humificação — indicativo da produção do humus — são parâmetros desnecessários. Assim, a humificação é a progressiva

auto-associação de biomoléculas que se degradam e se unem, constantemente, formando os HAs e, como consequência, aprimoram e melhoram a qualidade e fertilidade do solo.

Diversos estudos têm demonstrado os efeitos dos HAs sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos (Nunes et al., 2014; Salati et al., 2011; Rosa et al., 2009; Melo et al., 2008; Chen e Aviad, 1990):

- i. Cor: Os HAs apresentam uma coloração escura, favorecendo a retenção de calor no solo e a manutenção de sua temperatura;
- ii. Retenção de água: Os HAs podem reter moléculas de água por até 20 vezes o valor de sua massa, protegendo o solo dos processos erosivos, preservando também sua humidade;
- iii. União de partículas sólidas: Os HAs cimentam as partículas que constituem o solo. Ao formar agregados, as SH aumentam a porosidade do solo, diminuindo assim a sua densidade;
- iv. Complexação: Os HAs podem se complexar com os elementos metálicos do solo, detoxificando-o de íons e elementos tóxicos;
- v. Efeito tampão: Os HAs possuem função tamponante, atuando fortemente nos equilíbrios químicos que ocorrem na solução do solo;
- vi. Troca de íons: Os HAs propiciam as trocas de íons no solo — ácidos e bases trocáveis — elevando consideravelmente os valores de CTC;
- vii. Mineralização: Para a formação dos HAs, a MO ao se decompor libera íons e moléculas, tais como CO_2 , NH_4^+ , NO_3^- etc., os quais são — ou se convertem — em nutrientes para as plantas, aumentando a qualidade e fertilidade do solo.

Toda vez que um insumo agrícola orgânico é incorporado ao solo, espera-se que os atributos de qualidade e fertilidade do solo melhorem. Sabe-se que a maior parte do carbono orgânico da superfície do planeta encontra-se na MO humificada. Além de fornecer nutrientes para as plantas, as SH também podem estimular diretamente o desenvolvimento e o metabolismo das plantas através de mecanismos ainda não totalmente elucidados — é o caso da atividade hormono-similar (Scaglia et al., 2015; Primo et al., 2011; Chen e Aviad, 1990).

1.3.2. Matéria orgânica dissolvida (DOM)

A matéria orgânica dissolvida (DOM) constitui-se de um conjunto de compostos orgânicos provenientes da secreção, excreção e produtos de decomposição dos organismos terrestres e aquáticos que constituem a matéria orgânica particulada do solo, MO (Rodrigues e Bianchini, 2007; Wetzel, 1975).

Presente nos solos e nos corpos d'água, a DOM é composta por uma grande variedade de moléculas e estruturas químicas, as quais desempenham um papel multifuncional no meio ambiente (Scaglia et al., 2015; Pizzeghello et al., 2006; Zepp, 1997). Em termos moleculares, a DOM é composta, principalmente, por proteínas, aminoácidos, ácidos graxos, resinas, além de alguns compostos húmicos. Além disso, a concentração de cada substância depende de seu material de origem, das condições ambientais e, também, dos organismos decompositores. No mais, quaisquer alterações em sua composição podem afetar os processos químicos, físicos e biológicos de um ecossistema, bem como alterar o fluxo de matéria e energia no ciclo do carbono (Zepp, 1997). A medida que a DOM é liberada, seus compostos são concentrados na solução do solo e se disponibilizam para a sorção das raízes e nutrição das plantas (Rodrigues e Bianchini, 2007; Wetzel, 1975).

Tanto no solo quanto nos corpos d'água, a DOM participa de muitos processos biogeoquímicos, sendo um importante indicador de qualidade nos ambientes terrestres e aquáticos (Ussiri e Johnson, 2004). A liberação da DOM na solução do solo tem sua origem na lixiviação da matéria orgânica particulada — MO do solo — e da atividade dos micro-organismos que habitam no solo (Matlou e Haynes, 2006). Inúmeros fatores bióticos e abióticos controlam a dinâmica da

DOM no solo, e estão relacionados com o tempo e as características do local onde ocorrem os processos de formação e liberação dos compostos solúveis na solução do solo. Alguns destes fatores são determinantes para a concentração da DOM no solo, tais como as características químicas, físicas e biológicas do substrato, a composição microbiana do solo e fatores ambientais, por exemplo, a temperatura, a precipitação (chuvas), entre outros (Möller et al., 2005; Murphy et al., 2000; Brooks et al., 1999). Além disso, as práticas agrícolas e o manejo inadequado do solo alteram o equilíbrio da DOM, afetando os ciclos biogeoquímicos do solo (Chantigny, 2003).

A priori, a diferenciação entre a DOM e a MO do solo é arbitrária e determinada por meio da filtração da amostra de interesse em solução aquosa (Scaglia et al., 2015). Se tratando da MO do solo, ao filtra-la em um filtro com poros de 0,2-0,5 µm de diâmetro, o material retido no filtro é a MO particulada (MOP) e, o filtrado, consiste na DOM (Lombardi e Jardim, 1999).

De acordo com Scaglia et al. (2015), Pizzeghello et al. (2006), Munn et al. (2000), Witte et al. (1982) e Wetzel (1975) a DOM pode interagir com o solo e o meio ambiente da seguinte forma:

- i. Fonte de energia, a DOM fornece carbono orgânico para os micro-organismos do solo e, também, para as algas nos ambientes aquáticos;
- ii. Suas moléculas podem apresentar efeito hormono-similar, auxiliando no crescimento e desenvolvimento dos organismos vegetais;
- iii. A DOM pode formar complexos orgânicos com elementos traço ou com poluentes sintéticos, interferindo em sua mobilidade no solo e transferência para os sistemas aquáticos;
- iv. Atua na redução da radiação eletromagnética no meio aquático, prejudicando os organismos que dela necessitam;
- v. Altera a coloração dos corpos d'água, interferindo nos ciclos biogeoquímicos que ali ocorrem, além de alterar seus valores de DQO; entre outros fatores.

Das interações citadas acima, as mais relevantes para este trabalho são as relacionadas ao crescimento e desenvolvimento dos organismos vegetais, com foco na produção de plantas e culturas de interesse econômico. É o caso da atividade hormo-similar, foco deste Capítulo II.

2. OBJETIVOS DO CAPÍTULO II

Este estudo teve como objetivo principal estudar a atividade hormono-similar dos vermicompostos, no que diz respeito à sua ação auxino-similar. Ademais, propôs-se investigar quais as moléculas orgânicas — ou grupo de moléculas — que constituem os ácidos húmicos (HAs) e/ou a matéria orgânica dissolvida (DOM) e que foram as responsáveis por esta bioatividade.

Como objetivos específicos foram propostos:

- a.* Determinar os teores de HAs e DOM nos vermicompostos, além de estudar suas diferenças químicas em nível molecular;
 - b.* Através de bioensaios (testes de germinação) com sementes de *Lactuca sativa*, estudar a atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) dos HAs e da DOM extraídos dos vermicompostos;
 - c.* Estudar o efeito do tempo de vermicompostagem (estágios de maturação: fresco, estável e maturo) na bioatividade dos extratos de HAs e DOM;
 - d.* Estudar as frações orgânicas (HAs e/ou DOM) que apresentarem ação hormono-similar por meio de técnicas espectroscópicas de análise (^{13}C CPMAS-NMR e GC/MS) a fim de determinar quais moléculas orgânicas — ou grupo de moléculas — são responsáveis pelo efeito auxino-similar; e
 - e.* Se possível, determinar as vias metabólicas — ou processos bioquímicos — pelos quais os HAs e/ou a DOM atuam nos processos germinativos das sementes de *L. sativa*.
-

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Os vermicompostos e seus estágios de maturação

As amostras coletadas no Capítulo I e que foram utilizadas no monitoramento da vermicompostagem serão analisadas a fim de se investigar a atividade hormono-similar de duas de suas frações orgânicas, os HAs e a DOM. Essas amostras foram reclassificadas de acordo com seus estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Esta reclassificação teve como finalidade avaliar o efeito do tempo de vermicompostagem nas características químicas de seus extratos orgânicos, HAs e DOM, e seus efeitos na qualidade dos vermicompostos. Para compo-las, misturaram-se os materiais coletados nos seguintes tempos de amostragem:

- i. Fresco (F) — Material coletado nos tempos 0, 15 e 30 dias de vermicompostagem;
- ii. Estável (S) — Material coletado nos tempos 45 e 60 dias de vermicompostagem;
- iii. Maturo (M) — Material coletado nos tempos 90 e 135 dias de vermicompostagem.

Os tempos de coleta escolhidos para cada estágio de maturação foram determinados com base nos resultados obtidos na caracterização e monitoramento da vermicompostagem (item 4.3 — Capítulo I). Nos itens seguintes são apresentadas as metodologias adotadas nas extrações dos HAs e da DOM.

3.2. HAs

Os HAs foram extraídos de acordo com a metodologia sugerida pela IHSS (Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas) (Swift, 1996). Para isso, seguiram-se os passos:

- i. Em um becker de 1,0 L adicionaram-se 100,0 g de amostra (vermicomposto) e 1,0 L de solução de HCl 0,1 mol L⁻¹. A solução foi agitada manualmente durante 1 hora e, em seguida, decantou por 2 horas;
- ii. O sobrenadante (mistura de HAs, HF's e resíduos de humina) foi separado por sifonação. O precipitado (humina) foi descartado. Ao sobrenadante foi adicionado 1 L de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹. A solução foi agitada manualmente durante 4 horas e, em seguida, decantou por 16 horas;
- iii. Após a decantação, o precipitado (humina) foi descartado. O sobrenadante (mistura de HAs e HF's) foi centrifugado durante 20 min a 10.000 rpm;
- iv. Com o auxílio de um conta-gotas, o sobrenadante foi acidificado adicionando uma solução de HCl 6,0 mol L⁻¹ até obtenção do pH da suspensão entre 1 e 2. Em seguida, a suspensão decantou durante 12 horas;
- v. Ao término, os HAs estavam precipitados ao passo que os HF's permaneceram em solução. Os HAs foram separados por sifonação.

Após extração, os HAs foram purificados para eliminação de íons e substâncias indesejadas. A purificação foi realizada de acordo com os itens a seguir:

- i. Inicialmente, os HAs foram redissolvidos em uma solução de KOH 0,1 mol L⁻¹, a qual foi adicionada até que os HAs estivessem completamente dissolvidos. O volume necessário foi anotado;
 - ii. A massa de KCl necessária para a obtenção de [K⁺] = 3,0 mol L⁻¹ foi calculada e adicionada à solução. Em seguida, a amostra foi centrifugada a 15.000 rpm durante 20 minutos para a eliminação dos sólidos suspensos;
-

- iii. O sobrenadante foi acidificado adicionando HCl 6,0 mol L⁻¹, até a obtenção do pH da solução entre 1 e 2. Em seguida, a suspensão decantou por 16 horas, sendo então centrifugada a 10.000 rpm durante 10 min. O sobrenadante foi descartado;
- iv. Em um becker de plástico, duas soluções ácidas, uma de HCl 0,1 mol L⁻¹ e outra de HF 0,3 mol L⁻¹ foram adicionadas ao precipitado até sua completa suspensão. Em seguida, a solução decantou por 16 horas, sendo então centrifugada a 12.000 rpm por 20 min;
- v. Por último, o precipitado foi transferido para uma membrana de diálise, preparada segundo a metodologia de Mc Phie (1971). O material permaneceu em diálise em água ultrapura — com reposição constante — até que a água apresentasse um resultado negativo no teste para cloreto.³ Após a diálise, as amostras foram congeladas e liofilizadas. Assim, após a liofilização, os HAs foram armazenados em dessecador para análises e determinações futuras.

3.3. DOM

Para se extrair a DOM dos vermicompostos, em um Erlenmeyer de 250,0 mL foram adicionados 5,0 mg de amostra e 100 mL de água desionizada. As amostras foram aquecidas e agitadas em um banho de Dubnoff a 40°C, a 60 rpm durante 30 min. Em seguida, cada amostra foi centrifugada durante 15 min a 6.500 rpm e seu sobrenadante filtrado a vácuo. Foram utilizados filtros de acetato de celulose de 0,45 µm (Whatman).

O filtrado obtido (sobrenadante) correspondeu a DOM. Para preservar as amostras e evitar a oxidação de moléculas orgânicas mais lábeis, a solução foi purgada com N₂, para a remoção do oxigênio. Em seguida, as amostras foram congeladas e armazenadas a -4°C para análises e determinações futuras (D'Imporzano e Adani, 2006).

3.4. Testes de germinação

Os testes de germinação foram realizados por meio de bioensaios com sementes de alface *Lactuca sativa*, biologicamente certificadas, com diferentes soluções (HAs, DOM e AIA) e a amostra controle (KOH pH = 8). Os itens a seguir apresentam a metodologia adotada e informações adicionais acerca das sementes utilizadas.

3.4.1. Sementes de *L. sativa*

Para realização dos testes de germinação, as sementes de *L. sativa*, biologicamente certificadas e para fins científicos, foram adquiridas da empresa Fratelli Ingegnoli, em Milão, Itália.

Foram adquiridos 2 lotes, cada qual contendo 4 mil sementes. O primeiro lote foi utilizado nos testes de germinação com os HAs e o segundo nos bioensaios com a DOM e o AIA.

3.4.2. Bioensaios

A atividade hormono-similar dos HAs e da DOM extraídos de vermicompostos, relativa ao efeito auxino-similar, foi avaliada por meio da inibição do crescimento das raízes — e consequente efeito na germinação — em sementes de *L. sativa*. Estes bioensaios se basearam no princípio de que, quando aplicados em altas concentrações, os hormônios vegetais são potencialmente tóxicos às plantas. Sendo assim, nestes testes, as sementes de *L. sativa* foram submetidas a superdosagens

³ O teste para cloreto consistiu no gotejamento de AgNO₃ em uma alíquota da água de diálise. O possível surgimento de um precipitado branco indicaria a presença de cloreto em solução.

de soluções contendo substâncias com potencial atividade hormono-similar — HAs e DOM (Pizzeghello et al., 2006; Wang et al., 2001; Adani et al., 1997).

Para realização dos bioensaios, foram utilizadas placas de Petri revestida com papel de filtro (Whatman 91) humedecido com 1,4 mL de solução e 10 sementes de *L. sativa*.

Os testes biológicos foram realizados com soluções de HAs, DOM, AIA (amostra referência) e KOH (amostra controle). Com exceção da amostra controle, todas as concentrações foram expressas em [C], ou seja, mg de carbono por L de solução (mg C L^{-1}). Todas as soluções tiveram seus pHs ajustados a 8, utilizando KOH $1,0 \text{ mol L}^{-1}$.

Os valores de [C] da DOM e HAs foram determinados de acordo com o item 3.2 do Anexo 4 (M4 — Outras Metodologias de Análise). As concentrações analisadas foram:

- i. HAs: 100,0; 500,0; 750,0; 1000,0; 2000,0; 4000,0 e $6000,0 \text{ mg C L}^{-1}$;
- ii. DOM: 0,1; 1,0; 10,0; 100,0; 1000,0; 2000,0 e $4000,0 \text{ mg C L}^{-1}$;
- iii. AIA (Sigma Aldrich, I3750): 0,001; 0,004; 0,01; 0,06; 0,1 e $0,2 \text{ mg C L}^{-1}$; e
- iv. Controle: H_2O (testes com a DOM e AIA) ou KOH pH = 8 (testes com os HAs)

As placas de Petri foram vedadas com filme (Parafilm) e postas em caixas de papelão revestidas com papel alumínio. As amostras foram germinadas em câmara escura a 25°C , durante 48 h. Em seguida, as caixas e placas de Petri foram abertas, as sementes removidas e as raízes mensuradas. As medições foram realizadas com o auxílio de uma lupa (Figura 5 — II) (Pizzeghello et al., 2006; Wang et al., 2001).

O comprimento das raízes (rizoma) foi definido a partir da medida da extremidade da raiz até o ponto de diferenciação entre a raiz e o hipocotilo (raiz embrionária) (Figura 6 — II). Foram rejeitados os dados de raízes com comprimentos inferiores a 5,0 mm, consideradas como sementes não-germinadas (Wang et al., 2001).

Os experimentos foram realizados em triplicata, para cada concentração analisada foram preparadas 3 placas de Petri. Ou seja, ao todo foram 30 sementes por concentração estudada. O comprimento médio foi calculado para cada placa de Petri e os dados confrontados. Caso as médias não fossem coerentes ($DP > \sim 20\%$ da média) os dados eram rejeitados e os testes repetidos. Por fim, calculou-se a média das médias observadas por placa de Petri em uma mesma concentração.

O índice de comprimento (LI) foi calculado pela divisão do comprimento médio das raízes em uma amostra e a média do comprimento obtido na amostra controle, para cada concentração estudada. A atividade hormono-similar foi considerada presente — efeito auxino-simular observado / extrato bioativo — quando o $LI \text{ vs. } [C]$ calculado foi estatisticamente significativo ($\text{sig} < 0,05$) e os valores de LI estatisticamente diferentes por ANOVA One-way, $P < 0,05$ (item 3.4.3) (Ertani et al., 2013; Pizzeghello et al., 2006).

Figura 5 — II. Bioensaios com *L. sativa* para avaliação da atividade hormono-similar da DOM e HAS extraídos dos vermicompostos.

FONTE: Autoria própria.

a. Preparo das placas de Petri para condução dos bioensaios;

b. Abertura das caixas e placas de Petri após 48 h em câmara de germinação;

c. Medição das raízes e cálculo do LI para determinação da bioatividade dos HAS.

Figura 6 — II. Germinação da semente de *L. sativa* e desenvolvimento de seu hipocotilo e rizoma (raíz).

CRÉDITO: T. R. A. Silva

3.4.3. Tratamento estatístico dos dados

Os testes estatísticos de significância foram realizados por meio de ANOVA One-way. As diferenças entre os resultados em $P < 0,05$ foram avaliadas por teste de Duncan para a múltipla comparação das médias. O software IBM SPSS Statistics v.20 foi utilizado para a análise dos dados.

3.5. Caracterização dos extratos bioativos

Os extratos obtidos dos vermicompostos — HAs e DOM — que apresentarem bioatividade (item 3.4.2 — II), no que se refere a atividade hormono-similar e ao efeito auxino-similar, foram analisados por meio de técnicas espectroscópicas, ^{13}C CPMAS-NMR (ressonância magnética nuclear de ^{13}C por polarização cruzada e rotação no ângulo mágico) e GC/MS (cromatografia gasosa com detecção por espectrometria de massas. O uso destas técnicas teve como finalidade auxiliar a compreensão dos efeitos observados nos testes biológicos e, em seguida, elucidar — em termos bioquímicos — as vias pelas quais ocorre a inibição da germinação.

Neste estudo, apenas os HAs apresentaram efeito auxino-similar significativo. Os resultados e discussão acerca da bioatividade da DOM e dos HAs serão apresentados e discutidos nos itens oportunos, ao longo deste Capítulo II. Os itens a seguir descrevem as metodologias adotadas nas análises dos HAs por ^{13}C CPMAS-NMR e GC/MS.

3.5.1. ^{13}C CPMAS-NMR

Os espectros dos HAs obtidos por ^{13}C CPMAS-NMR no estado sólido foram adquiridos a 10 kHz em um espectrometro Bruker AMX 600 (Rheinstetten, Alemanha) utilizando um probe de 4,0 mm CP-MAS. A taxa de repetição de pulso foi fixada em 0,5 s, o tempo de contato em 1,0 ms e 3200 varreduras.

O tempo de contato de 1,0 ms foi determinado após os experimentos de VCT (variação do tempo de contato). O erro do sinal adquirido, causado pela utilização do contacto médio, foi determinado ao comparar a intensidade do sinal na ausência de relaxamento de carbono — I_0 — e a intensidade do sinal medido — I_{top} — no tempo de contato ótimo. Nestas condições, verificou-se que a espectroscopia de ^{13}C CPMAS-NMR fornece dados quantitativos acerca dos teores de C presentes nos HAs. Os deslocamentos químicos (δ) dos espectros de ^{13}C CPMAS-NMR foram referenciados com tetrametilsilano (TMS) ($\delta = 0$ ppm).

Os espectros foram elaborados utilizando o software Bruker TOPSPIN 1.3 (Rheinstetten, Alemanha).

3.5.2. GC/MS

Para obtenção da solução de HAs, 25,0 mL de uma solução de $100,0 \mu\text{g C L}^{-1}$ teve seu pH ajustado à 8, utilizando uma solução de KOH $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ sob agitação magnética. Após 2 min com o pH constante, a solução foi filtrada em microfibras de vidro de $0,45 \mu\text{m}$ (Whatman) em um sistema pressurizado.

Para a análise dos HAs via GC/MS, as amostras foram derivatizadas. Para isso, em $75,0\text{--}100,0 \mu\text{L}$ da solução de HAs foram adicionados:

- i. 5,0 mL de ácido mirístico D27 (Sigma Aldrich, 366889), adicionados como padrão interno. Em seguida, as amostras foram completamente evaporadas sob vácuo constante;
- ii. $3,0 \mu\text{L}$ de ácidos graxos metil ésteres (Sigma Aldrich, 4-7801), os quais foram adicionados como marcadores dos espectros de GC/MS;
- iii. $10,0 \mu\text{L}$ de cloridrato de metoxiamina (Sigma Aldrich, 33045) em piridina (Sigma Aldrich, 360570) a uma concentração de $40,0 \text{ g L}^{-1}$. As misturas foram agitadas a 30°C durante 90 min;
- iv. $90,0 \mu\text{L}$ de N-metil-N-trimethylsilyltrifluoroacetamide com 1,0% de trimetilclorosilano (Sigma Aldrich, 3-3148). Em seguida, as amostras foram incubadas a 37°C durante 30 min.

A composição química da HAs foi determinada utilizando uma cromatógrafo Agilent 5975C Series GC/MSD (Santa Clara, Estados Unidos) e uma coluna capilar ZB-Semivolatiles de $30,00 \text{ m} \times 250,00 \mu\text{m} \times 0,25 \mu\text{m}$ (ID). O gás de arraste utilizado foi o He, injetado a um fluxo de $1,1 \text{ mL min}^{-1}$. $1,0 \mu\text{L}$ de amostra foi injetado utilizando um injetor GC CTC PAL a 250°C em modo de splitless. O programa de temperatura foi fixado em 60°C durante 1 min e, em seguida, aumentado para 325°C a uma velocidade de $10^\circ\text{C min}^{-1}$. A temperatura final foi mantida durante 10 min. A linha de transferência para o espectrometro de massa foi mantida a 290°C . Os espectros de massa foram obtidos por impacto eletrônico a 70 eV e os dados coletados em uma faixa entre 50-660 m/Z. Os compostos foram identificados por comparação com os espectros de massa da biblioteca Agilent Fiehn GC/MS Metabolomics RTL Library, utilizando o software AMDIS (Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System software, NIST 08).

4. RESULTADOS

4.1. HAs e DOM nos vermicompostos

A determinação dos HAs e da DOM (Tabela 1 — II) foi importante para a tomada de conhecimentos acerca do potencial nutritivo dos vermicompostos. Conforme citado na introdução, tanto os HAs como a DOM são frações essenciais para se inferir sobre a fertilidade de um insumo agrícola, orgânico. Os HAs são passíveis de extração e quantificação (embora o processo seja longo, com diversas etapas e frequentes perdas de materiais) e, já a DOM, não é passível de quantificação, uma vez que se trata apenas de compostos orgânicos solúveis de massa desprezível.

Os teores de carbono foram determinados tanto para os HAs como para a DOM nos diferentes estágios de maturação (Tabela 1 — II). Estas determinações tiveram como objetivo a obtenção das concentrações de C, úteis no preparo das soluções de HAs e DOM para os testes de germinação.

Tabela 1 — II. Teor de HAs nos vermicompostos VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL em diferentes estágios de maturação e, também, teor de C da DOM e dos HAs (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).

	VRC	DOM	HAs
	HAs g kg ⁻¹	C g kg ⁻¹	C g kg ⁻¹
VRC—STD—F	78,85 $\pm$ 21,01ab	5,11 $\pm$ 0,38ab	57,93 $\pm$ 10,48c
VRC—STD—S	52,28 $\pm$ 15,87a	4,53 $\pm$ 0,32a	13,20 $\pm$ 0,73a
VRC—STD—M	86,01 $\pm$ 22,51Aab	10,11 $\pm$ 0,42Cc	20,78 $\pm$ 0,99Bb
VRC—L—F	52,41 $\pm$ 9,42a	8,74 $\pm$ 0,19b	37,38 $\pm$ 5,13c
VRC—L—S	53,91 $\pm$ 10,01ab	4,52 $\pm$ 0,30a	21,39 $\pm$ 7,13b
VRC—L—M	71,52 $\pm$ 09,32Ab	12,37 $\pm$ 0,76Dc	16,82 $\pm$ 2,86ABa
VRC—A—F	64,28 $\pm$ 15,16a	7,14 $\pm$ 0,00ab	41,85 $\pm$ 2,91c
VRC—A—S	76,97 $\pm$ 8,44a	6,79 $\pm$ 0,23a	24,85 $\pm$ 13,43b
VRC—A—M	91,81 $\pm$ 9,24Ab	7,65 $\pm$ 0,36Bc	14,69 $\pm$ 2,84ABa
VRC—AL—F	66,24 $\pm$ 8,91a	4,97 $\pm$ 0,18c	40,55 $\pm$ 2,82c
VRC—AL—S	74,85 $\pm$ 11,21ab	4,00 $\pm$ 0,12a	15,00 $\pm$ 3,39ab
VRC—AL—M	98,95 $\pm$ 10,98Ab	4,08 $\pm$ 0,00Aab	10,75 $\pm$ 4,89Aa

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra minúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados de uma mesma amostra em diferentes estágios de maturação: F, S e M. Valores na mesma linha, seguidos pela mesma letra maiúscula, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way e comparam os resultados entre todas as amostras no estágio de maturação M.

LEGENDA: AH Ácidos húmicos; DOM Matéria orgânica dissolvida. VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Amostra controle, apenas o substrato orgânico. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

UNIDADE: HAs g kg⁻¹ (grama de HAs por quilo de vermicomposto), C g kg⁻¹ (grama de C por quilo de HAs ou DOM).

As variações nos teores de C nos diferentes estágios de maturação permitiram inferir sobre os processos de transformação da matéria orgânica que resultaram em diferentes teores de MO e TOC nos vermicompostos, e consequências nos demais atributos de fertilidade, como CTC e relação C:N, por exemplo (da Tabela 8 — I à Tabela 17 — I).

Os teores de C para a DOM variaram aleatoriamente entre os estágios de maturação. Era esperado que estes valores diminuíssem, conforme observado nas amostras VRC—STD e VRC—A. Todos os valores de C para a DOM são estatisticamente diferentes na comparação entre amostras maduras (ANOVA One-way, $P < 0,05$). Já o C dos HAs diminuiu conforme o esperado. Os teores de C reduziram no sentido $M < S < F$ com valores estatisticamente diferentes (ANOVA One-way, $P < 0,05$) — exceto para a amostra VRC—STD (Tabela 1 — II).

Em geral, os HAs não variaram entre os estágios F e S. No entanto, os vermicompostos maduros (M) apresentaram HAs com teores estatisticamente diferentes — exceto a amostra VRC—STD, a qual apresentou resultados semelhantes em todas os estágios de maturação (ANOVA One-way, $P < 0,05$). As diferenças mais significativas entre os estágios F e M foram observadas nos tratamentos VRC—A e VRC—AL, ~ 60% de diferença. No entanto, todos os vermicompostos maduros apresentaram valores de HAs estaticamente iguais (ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Os vermicompostos que receberam resíduos de curutume (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) variaram seus teores de HAs no estágio F entre 52,41-66,24 g kg⁻¹. Já no estágio M estes valores variaram entre 71,52-98,95 g kg⁻¹. Os valores mais elevados foram observados nas amostras VRC—AL (98,95 g kg⁻¹) (Tabela 1 — II).

4.2. Atividade hormono-similar — Efeito auxino-similar

O efeito da aplicação das soluções de HAs e DOM na germinação de sementes de *L. sativa* foi avaliado e a bioatividade dos extratos mensurada. Os efeitos observados variaram entre as amostras (HAs e DOM) e o estágio de maturação de seus respectivos vermicompostos.

Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos nos testes de germinação com HAs, DOM e os comparam com os dados obtidos nos bioensaios com o AIA.

4.2.1. Bioatividade dos HAs

De acordo com os testes de germinação, apenas alguns HAs apresentaram atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) (Tabela 2 — II).

Os HAs extraídos dos vermicompostos VRC—L, em todos os estágios de maturação (HA—L—F, HA—L—S e HA—L—M), não apresentaram bioatividade, ou seja, não foi observada a inibição esperada no desenvolvimento das raízes. No entanto, os HAs extraídos dos vermicompostos VRC—AL apresentaram resultados positivos em todos os estágios de maturação (HA—AL—F, HA—AL—S e HA—AL—M). Já os HAs extraídos dos vermicompostos VRC—A e VRC—STD apresentaram resultados positivos para as amostras HA—STD—S, HA—STD—M, HA—A—S e HA—A—M ($\text{sig} < 0,05$ e valores de LI estatisticamente diferentes — ANOVA One-way, $P < 0,05$).

Nos testes de germinação foram aplicadas soluções com concentrações entre 100,0-6000,0 mg C L⁻¹. No entanto, a atividade auxino-similar dos HAs foi observada apenas no intervalo entre 500,0-6000,0 mg C L⁻¹. O coeficiente angular das curvas logarítmicas — razão LI:[C] — foi utilizada a fim de avaliar a intensidade do efeito auxino similar, a qual seguiu a seguinte ordem: HA—STD—M > HA—A—M > HA—AL—F > HA—STD—S > HA—AL—M > HA—AL—S (Tabela 3 — II, Tabela 4 — II e Figura 7 — II).

Em concentrações mais elevadas, notou-se a não-germinação das sementes de *L. sativa*, atribuída à toxicidade das substâncias e metabólitos presentes nos HAs. Em 4000 mg C L⁻¹, 70% das sementes não germinaram e em 6000 mg C L⁻¹, nenhuma germinação considerável foi observada (raiz > 5,0 mm) (Figura 8 — II).

O efeito auxino-similar mais intenso foi observado nas amostras HA—STD—M e HA—A—M sugerindo que a vermicompostagem aumentou a atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) como uma consequência das transformações químicas, físicas e biológicas da MO contida nos resíduos em estudo.

Tabela 2 — II. Atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) observado nos bioensaios com os HAs extraídos de diferentes vermicompostos (VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL) nos estágios de maturação fresco, estável e maturo, utilizando sementes de *L. sativa*.

	Efeito / Intervalo	Equação da Reta	R ²	Sig.
HA—STD—F	n.o.	-	-	-
HA—STD—S	500,0-6000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,152 \times \ln(x) + 2,044$	0,950	0,005
HA—STD—M	500,0-6000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,361 \times \ln(x) + 3,402$	0,900	0,014
HA—L—F	n.o.	-	-	-
HA—L—S	n.o.	-	-	-
HA—L—M	n.o.	-	-	-
HA—A—F	n.o.	-	-	-
HA—A—S	n.o.	-	-	-
HA—A—M	500,0-6000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,262 \times \ln(x) + 2,332$	0,984	0,001
HA—AL—F	500,0-6000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,157 \times \ln(x) + 1,930$	0,982	0,009
HA—AL—S	500,0-6000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,134 \times \ln(x) + 1,816$	0,955	0,004
HA—AL—M	500,0-6000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,148 \times \ln(x) + 1,917$	0,930	0,008
AIA	0,001-0,01 mg C L ⁻¹	$y = -0,193 \times \ln(x) - 0,834$	0,962	0,019

LEGENDA: n.o. Não observado (o efeito auxino-similar). HA—STD Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—STD; HA—L Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—L; HA—A Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—A; HA—AL Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—AL. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Tabela 3 — II. Índice de crescimento (LI) das raízes de *L. sativa* sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e de HAs extraídos de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte I: amostras VRC—STD e VRC—L.

[C] _{mg C L⁻¹}	Índice de Crescimento, LI						
	AIA	HA—STD—F	HA—STD—S	HA—STD—M	HA—L—F	HA—L—S	HA—L—M
0,001	0,49 ± 0,22d						
0,004	0,28 ± 0,06c						
0,006	0,11 ± 0,02b						
0,01	0,06 ± 0,01a						
0,04	0,04 ± 0,01a						
0,06	0,04 ± 0,04a						
0,1	0,02 ± 0,02a						
0,2	0,00 ± 0,00a						
<hr/>							
100,0		1,02 ± 0,11ab	1,08 ± 0,02c	1,06 ± 0,16d	0,82 ± 0,11c	0,69 ± 0,13b	0,78 ± 0,12a
500,0		0,85 ± 0,16ab	1,06 ± 0,16c	1,05 ± 0,13d	0,85 ± 0,07c	0,70 ± 0,14b	0,78 ± 0,08a
1000,0		0,91 ± 0,16b	1,02 ± 0,07c	0,94 ± 0,14cd	0,78 ± 0,04bc	0,64 ± 0,04b	0,54 ± 0,06a
2000,0		0,86 ± 0,23ab	0,93 ± 0,06bc	0,83 ± 0,06c	0,75 ± 0,09bc	0,63 ± 0,04b	0,56 ± 0,14a
4000,0		0,70 ± 0,02ab	0,78 ± 0,20ab	0,43 ± 0,07b	0,69 ± 0,03b	0,60 ± 0,11b	0,66 ± 0,19a
6000,0		0,58 ± 0,06a	0,69 ± 0,14a	0,13 ± 0,05a	0,52 ± 0,02a	0,40 ± 0,05a	0,75 ± 0,08a

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em P < 0,05 de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.
LEGENDA: HA—STD Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—STD; HA—L Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—L. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Tabela 4 — II. Índice de crescimento (LI) das raízes de *L. sativa* sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e de HAs extraídos de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte I: amostras VRC—A e VRC—AL.

[C] _{mg C L⁻¹}	Índice de Crescimento, LI						
	AIA	HA—A—F	HA—A—S	HA—A—M	HA—AL—F	HA—AL—S	HA—AL—M
0,001	0,49 ± 0,22d						
0,004	0,28 ± 0,06c						
0,006	0,11 ± 0,02b						
0,01	0,06 ± 0,01a						
0,04	0,04 ± 0,01a						
0,06	0,04 ± 0,04a						
0,1	0,02 ± 0,02a						
0,2	0,00 ± 0,00a						
100,0		0,72 ± 0,06b	0,96 ± 0,09b	0,73 ± 0,00e	1,04 ± 0,09c	0,95 ± 0,24c	1,08 ± 0,17c
500,0		0,72 ± 0,06ab	0,75 ± 0,09b	0,68 ± 0,04e	0,95 ± 0,04c	0,97 ± 0,07bc	0,98 ± 0,07c
1000,0		0,87 ± 0,04a	0,80 ± 0,21b	0,53 ± 0,02d	1,17 ± 0,11d	0,88 ± 0,04bc	0,91 ± 0,01b
2000,0		0,72 ± 0,15ab	0,79 ± 0,03b	0,40 ± 0,09c	0,74 ± 0,08b	0,85 ± 0,11b	0,80 ± 0,06b
4000,0		0,66 ± 0,10a	0,70 ± 0,01ab	0,14 ± 0,01b	0,66 ± 0,03ab	0,70 ± 0,17ab	0,75 ± 0,0a4
6000,0		0,68 ± 0,02a	0,54 ± 0,05a	0,04 ± 0,06a	0,54 ± 0,07a	0,63 ± 0,01a	0,58 ± 0,06a

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: HA—A Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—A; HA—AL Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto HA—AL. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Figura 7.a — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com os HAs bioativos extraídos dos vermicompostos VRC—STD (HA—STD—S, e HA—STD—M), utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 7.b — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com os HAs bioativos extraídos do vermicomposto VRC—A (HA—A—M), utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 7.c — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com os HAs bioativos extraídos dos vermicompostos VRC—AL (HA—AL—F, HA—AL—S, e HA—AL—M), utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 7 — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com os HAs bioativos extraídos de vermicompostos em diferentes estágios de maturação, utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 8 — II. Testes de germinação com os HAs extraídos do vermicomposto VRC—A (amostra HA—A—M) em diferentes concentrações, utilizando sementes de *L. sativa*.

FONTE: Autoria própria.

Controle (KOH pH = 8)

100,0 mg C L⁻¹

1000,0 mg C L⁻¹

2000,0 mg C L⁻¹

4000,0 C mg L⁻¹

6000,0 C mg L⁻¹

4.2.2. Bioatividade da DOM

Os dados obtidos nos testes de germinação com a DOM foram diferentes dos resultados observados nos testes com os HAs, quer seja pelo tipo de amostra que apresentou bioatividade ou, principalmente, pela intensidade do efeito observado.

Em geral, apenas algumas amostras apresentaram atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) (Tabela 5 — II). Dentre os grupos de amostra, nenhuma DOM extraída dos vermicompostos VRC—STD (DOM—STD—F, DOM—STD—S e DOM—STD—M) apresentou bioatividade. Por outro lado, todas as DOM extraídas dos vermicompostos VRC—A (DOM—A—F, DOM—A—S e DOM—A—M) se apresentaram bioativas durante os testes de germinação. Já a DOM das amostras VRC—L e VRC—AL não apresentaram efeito auxino-similar no estágio fresco (DOM—L—F e DOM—AL—F), apenas nos estágios estável e maturo (DOM—L—S, DOM—L—M, DOM—AL—S e DOM—AL—M).

Tabela 5 — II. Atividade hormono-similar (efeito auxino-similar) observado nos bioensaios com a DOM extraída de diferentes vermicompostos (VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL) nos estágios de maturação fresco, estável e maturo, utilizando sementes de *L. sativa*.

	Efeito / Intervalo	Equação da Reta	R ²	Sig.
DOM—STD—F	n.o.	-	-	-
DOM—STD—S	n.o.	-	-	-
DOM—STD—M	n.o.	-	-	-
DOM—L—F	n.o.	-	-	-
DOM—L—S	100,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,075 \times \ln(x) + 1,223$	0,909	0,047
DOM—L—M	100,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,081 \times \ln(x) + 1,249$	0,885	0,059
DOM—A—F	10,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,090 \times \ln(x) + 1,218$	0,939	0,006
DOM—A—S	10,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,083 \times \ln(x) + 1,165$	0,936	0,007
DOM—A—M	1,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,073 \times \ln(x) + 1,009$	0,913	0,003
DOM—AL—F	n.o.	-	-	-
DOM—AL—S	1,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,079 \times \ln(x) + 1,130$	0,958	0,001
DOM—AL—M	1,0-4000,0 mg C L ⁻¹	$y = -0,085 \times \ln(x) + 1,064$	0,947	0,000
AIA	0,001-0,01 mg C L ⁻¹	$y = -0,193 \times \ln(x) - 0,834$	0,962	0,019

LEGENDA: n.o. Não observado (o efeito auxino-similar). DOM—STD Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—STD; DOM—L Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—L; DOM—A Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—A; DOM—AL Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—AL. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Ao comparar os valores calculados de LI obtidos nos testes com DOM (Tabela 6 — II e Tabela 7 — II) com os dados calculados para os mesmos testes com HAs (Tabela 3 — II e Tabela 4 — II) é possível observar que os resultados obtidos nos testes com HAs são mais expressivos e significantes. Em muitos casos, nas concentrações mais altas de HAs, a inibição das germinações foi total; ao passo que nos testes com a DOM o efeito observado se limitou à inibição da germinação de algumas sementes, com resultados não-homogêneos (Figura 10 — II). Embora seja possível observar um aumento na inibição proporcional ao aumento na concentração da DOM, os resultados não são expressivos, embora significantes do

ponto de vista estatístico ($\text{sig} < 0,05$ e valores de LI estatisticamente diferentes — ANOVA One-way, $P < 0,05$). Mesmo nas concentrações mais elevadas ($4000,0 \text{ mg C L}^{-1}$) foram observadas sementes que se desenvolveram tanto quanto nos testes com a amostra controle (solução KOH pH = 8).

Nos testes de germinação foram aplicadas soluções com concentrações que variaram entre $0,1\text{-}4000,0 \text{ mg C L}^{-1}$. No entanto, a atividade auxino-similar da DOM foi observada apenas em intervalos que variaram entre $1,0\text{-}4000,0 \text{ mg C L}^{-1}$ para as amostras DOM—A—M, DOM—AL—S e DOM—AL—M; de $10,0\text{-}4000,0 \text{ mg C L}^{-1}$ para as amostras DOM—A—F e DOM—A—S; e de $100,0\text{-}4000,0 \text{ mg C L}^{-1}$ para as amostras DOM—L—S e DOM—L—M.

O coeficiente angular das curvas logarítmicas — razão $\text{LI}:[\text{C}]$ — foi utilizada a fim de avaliar a intensidade do efeito auxino similar, a qual seguiu a seguinte ordem: DOM—AL—M > DOM—AL—S > DOM—A—M > DOM—A—F > DOM—A—S > DOM—L—S > DOM—L—M (Tabela 5 — II e Figura 9 — II).

Conforme observado nos testes com os HAs, a DOM extraída de vermicompostos em estágios mais avançados de maturação (S e M) apresentaram-se bioativos, ao passo que os demais, não. A presença da atividade hormono-similar da DOM pode estar relacionada aos componentes químicos dos resíduos de curtume, uma vez que a DOM extraída do vermicomposto controle (VRC—STD) não apresentou efeito auxino-similar.

Tabela 6 — II. Índice de crescimento (LI) das raízes de *L. sativa* sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e da DOM extraída de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte I: amostras VRC—STD e VRC—L.

[C] mg C L^{-1}	Índice de Crescimento, LI						
	AIA	DOM—STD—F	DOM—STD—S	DOM—STD—M	DOM—L—F	DOM—L—S	DOM—L—M
0,001	0,49 $\pm$ 0,22d						
0,004	0,28 $\pm$ 0,06c						
0,006	0,11 $\pm$ 0,02b						
0,01	0,06 $\pm$ 0,01a						
0,04	0,04 $\pm$ 0,01a						
0,06	0,04 $\pm$ 0,04a						
0,1	0,02 $\pm$ 0,02a						
0,2	0,00 $\pm$ 0,00a						
0,1		0,67 $\pm$ 0,01a	0,99 $\pm$ 0,21bc	1,16 $\pm$ 0,16c	1,03 $\pm$ 0,11b	0,95 $\pm$ 0,16d	0,95 $\pm$ 0,07d
1,0		0,60 $\pm$ 0,03a	0,99 $\pm$ 0,19bc	1,18 $\pm$ 0,03c	1,07 $\pm$ 0,09b	0,99 $\pm$ 0,13d	0,94 $\pm$ 0,03d
10,0		0,98 $\pm$ 0,07b	1,19 $\pm$ 0,11c	1,13 $\pm$ 0,16c	1,01 $\pm$ 0,06b	0,91 $\pm$ 0,05cd	0,88 $\pm$ 0,07d
100,0		1,02 $\pm$ 0,07b	1,08 $\pm$ 0,24bc	1,08 $\pm$ 0,10bc	0,99 $\pm$ 0,09b	0,86 $\pm$ 0,13c	0,85 $\pm$ 0,05cd
1000,0		1,04 $\pm$ 0,10b	0,94 $\pm$ 0,07bc	0,90 $\pm$ 0,05ab	0,68 $\pm$ 0,08a	0,76 $\pm$ 0,05b	0,75 $\pm$ 0,11bc
2000,0		0,92 $\pm$ 0,12b	0,83 $\pm$ 0,10ab	0,81 $\pm$ 0,07a	0,67 $\pm$ 0,04a	0,66 $\pm$ 0,03ab	0,64 $\pm$ 0,01ab
4000,0		0,69 $\pm$ 0,10a	0,59 $\pm$ 0,05a	0,74 $\pm$ 0,12a	0,61 $\pm$ 0,04a	0,57 $\pm$ 0,04a	0,53 $\pm$ 0,05a

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$ de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: DOM—STD Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—STD; DOM—L Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—L. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Tabela 7 — II. Índice de crescimento (LI) das raízes de *L. sativa* sob aplicação de soluções com diferentes concentrações de ácido indol-3-acético (AIA) e da DOM extraída de vermicompostos em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo. Parte II: amostras VRC—A e VRC—AL.

[C] _{mg C L⁻¹}	Índice de Crescimento, LI						
	AIA	DOM—A—F	DOM—A—S	DOM—A—M	DOM—AL—F	DOM—AL—S	DOM—AL—M
0,001	0,49 ± 0,22d						
0,004	0,28 ± 0,06c						
0,006	0,11 ± 0,02b						
0,01	0,06 ± 0,01a						
0,04	0,04 ± 0,01a						
0,06	0,04 ± 0,04a						
0,1	0,02 ± 0,02a						
0,2	0,00 ± 0,00a						
0,1		0,97 ± 0,03d	1,02 ± 0,09d	1,02 ± 0,03e	1,02 ± 0,04c	1,14 ± 0,08e	1,02 ± 0,13e
1,0		1,01 ± 0,02cd	1,01 ± 0,09d	0,98 ± 0,05e	1,02 ± 0,02c	1,14 ± 0,03e	1,05 ± 0,07de
10,0		0,96 ± 0,02cd	0,92 ± 0,05cd	0,80 ± 0,03d	0,90 ± 0,23bc	0,92 ± 0,09d	0,88 ± 0,08d
100,0		0,87 ± 0,13c	0,87 ± 0,01c	0,78 ± 0,04d	0,82 ± 0,03b	0,75 ± 0,07c	0,66 ± 0,08c
1000,0		0,65 ± 0,07b	0,60 ± 0,05b	0,57 ± 0,01c	0,77 ± 0,07b	0,66 ± 0,06bc	0,54 ± 0,09bc
2000,0		0,50 ± 0,02a	0,52 ± 0,03ab	0,44 ± 0,05b	0,80 ± 0,07b	0,56 ± 0,05b	0,45 ± 0,07b
4000,0		0,43 ± 0,09a	0,45 ± 0,06a	0,41 ± 0,04a	0,51 ± 0,07a	0,39 ± 0,05a	0,29 ± 0,03a

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em P < 0,05 de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.
LEGENDA: DOM—A Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—A; DOM—AL Matéria orgânica dissolvida extraída do vermicomposto VRC—AL. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Figura 9.a — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com a DOM bioativa extraída dos vermicompostos VRC-L (DOM-L-S e DOM-L-M), utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 9.b — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com a DOM biotiva extraída dos vermicompostos VRC-A (DOM-A-F, DOM-A-S e DOM-A-M), utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 9.c — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com a DOM bioativa extraída dos vermicompostos VRC-AL (DOM-AL-F, DOM-AL-S e DOM-AL-M), utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 9 — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com a DOM bioativa extraída de vermicompostos em diferentes estágios de maturação, utilizando sementes de *L. sativa*.

Figura 10 — II. Testes de germinação com a DOM extraída do vermicomposto VRC—A (réplica aleatória da amostra DOM—A—M) em diferentes concentrações, utilizando sementes de *L. sativa*.

FONTE: Autoria própria.

4.2.3. Bioatividade do AIA

Acerca dos bioensaios realizados com o ácido indol-3-acético — amostra referência — o AIA inibiu o crescimento das raízes em todas as concentrações analisadas (0,001-0,2 mg C L⁻¹). Além disso, desde as concentrações mais baixas foi observada a ação hormonal. Os valores de LI diminuíram de 0,001 até 0,01 mg C L⁻¹ indicando uma diferença estatística significativa em seus resultados. No intervalo entre 0,01-0,2 mg C L⁻¹ todos os LI são estatisticamente iguais (Figura 11 — II)

Figura 11 — II. Efeito auxino-similar observado em testes de germinação com AIA, utilizando sementes de *L. sativa*.

Em geral, o crescimento das raízes foi quase totalmente inibido em todas as amostras, com apenas 10-20% das sementes germinadas. Em 0,2 mg C L⁻¹, 100% das sementes tiveram o crescimento de suas raízes inibidas e não germinaram (Figura 12 — II e dados já apresentados na Tabela 3 — II, Tabela 4 — II, Tabela 6 — II e Tabela 7 — II).

Não é possível estabelecer uma relação direta entre uma concentração de AIA com outra de DOM ou HAs, em que os efeitos observados sejam proporcionais entre si, uma vez que diversos fatores estão relacionados com as funções biológicas dos organismos vegetais. No mais, as moléculas que compõem tanto a DOM como os HAs é que seriam as responsáveis por esta função, ao passo que nos testes com AIA o efeito é atribuído à uma única molécula, e não a um conjunto de compostos orgânicos.

Em resumo, o ato ou efeito de inibir o crescimento das raízes é atribuído, naturalmente, à presença do hormônio vegetal AIA, uma auxina que é naturalmente produzida pelas plantas. A busca por compostos orgânicos com ação similar ao efeito auxino é importante para inferir sobre o potencial fertilizante de compostos e vermicompostos. Tanto os HAs como a DOM apresentaram atividade hormono-similar referente à ação auxino-similar, contudo, a ação dos HAs foi bastante superior, a ponto de anular o crescimento das raízes e a germinação das sementes. Já na DOM este efeito não foi tão acentuado (estatisticamente significativo), embora também tenha inibido o crescimento das raízes.

Neste sentido, nos itens seguintes foram apresentados os resultados obtidos nas análises de caracterização apenas dos HAs, suas estruturas e composição, relacionando-os à capacidade efeito auxino-similar dos vermicompostos.

Figura 12 — II. Testes de germinação com o AIA em diferentes concentrações, utilizando sementes de *L. sativa*.

FONTE: Autoria própria.

Controle (H₂O)

0,001 mg C L⁻¹

0,006 mg C L⁻¹

0,06 mg C L⁻¹

0,1 mg C L⁻¹

0,2 mg C L⁻¹

4.3. ^{13}C CPMAS-NMR

Como é sabido, a técnica ^{13}C CPMAS-NMR pode ser utilizada na obtenção de informações simples — não conclusivas — acerca da composição macromolecular dos HAs. Além disso, se trata de uma técnica útil na análise geral das modificações ocorridas ao longo dos processos de transformação da MO em decorrência da vermicompostagem e seus estágios de maturação.

Analisando as áreas integradas dos espectros de ^{13}C CPMAS-NMR (Tabela 8 — II), nos deslocamentos químicos (δ) entre 0-47 ppm foram identificados os grupos de moléculas que continham C ligados a cadeias alifáticas ou ligados a H, presentes na estrutura dos HAs (ácidos graxos e/ou produtos derivados de cutina ou de moléculas similares aos esteróis). Nos deslocamentos químicos no intervalo de 47-115 ppm observaram-se os grupos moléculares que continham C de O-alquil e de di-O-alquil, normalmente atribuídos aos carboidratos (por exemplo, celulose e hemicelulose) e, também, C de O-CH₃ (produtos derivados de lignina) ou N-alquila (moléculas de proteínas e similares). Já entre 115-160 ppm foram observados os grupamentos contendo C aromático, grupos fenilas, fenol, e também C de éter (derivados de lignina). Já nos deslocamentos químicos entre 160-210 ppm, foram indicados os grupos de moléculas que continham C carboxílico e/ou cetílico (Ertani et al., 2013; Tambone et al., 2013).

A análise das áreas integradas indicou que os HAs são substancialmente iguais, independentemente da mistura de resíduos (amostras VRC) e do estágio de maturação dos vermicompostos — se são frescos (F), estáveis (S) ou maduros (M) (Tabela 8 — II).

Ao analisarmos os espectros de ^{13}C CPMAS-NMR, nota-se que os resultados são nitidamente iguais, sendo facilmente sobrepostos — indiferente da matriz e do estágio de maturação (Figura 13 — II). Assim, sugere-se que as modificações macromoleculares ocorridas durante a vermicompostagem foram pouco significativas.

Com base na análise dos espectros e de suas áreas integradas, entende-se que a técnica de ^{13}C CPMAS-NMR não nos forneceu quaisquer dados úteis sobre a concentração e formação de moléculas bioestimulantes com efeito auxino-similar nos testes de germinação. Espera-se que por meio da técnica de GC/MS seja possível identificar estas moléculas — ou grupos de moléculas — e, também, quantificá-las, além de permitir a elucidação — em termos bioquímicos — das vias pelas quais ocorre a atividade hormono-similar dos HAs.

Tabela 8 — II. Áreas integradas dos picos obtidos por ^{13}C CPMAS-NMR dos HAs extraídos de diferentes vermicompostos nos estágios de maturação fresco, estável e maturo.

Intervalo (δ) ppm	0-47	47-115	115-160	160-210
Tipo de C	C alifático ligado a outras cadeias	O-CH ₃ ou N-alquil	C aromático	C carboxílico
	C ligado a H	C ligado a O-alquil	C fenólico	C cetônico
		C ligado a di-O-alquil	C éter-fenílico	
HA—STD—F	20,38	47,94	21,06	10,61
HA—STD—S	20,58	49,75	19,50	10,17
HA—STD—M	19,93	49,22	20,45	10,39
HA—L—F	21,54	47,69	20,64	10,12
HA—L—S	21,33	47,81	20,44	10,42
HA—L—M	20,54	47,85	21,53	10,08
HA—A—F	21,57	48,18	19,90	10,35
HA—A—S	23,76	46,65	19,62	9,97
HA—A—M	20,74	49,11	20,14	10,00
HA—AL—F	20,33	46,61	21,23	11,83
HA—AL—S	22,07	48,41	19,41	10,11
HA—AL—M	20,31	47,80	21,15	10,74

LEGENDA: HA—STD Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—STD; HA—L Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—L; HA—A Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—A; HA—AL Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—AL. AIA Ácido indol-3-acético. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

HA—STD—F

HA—STD—S

HA—STD—M

Figura 13.a — II. Espectros de ^{13}C CPMAS-NMR dos
HAs extraídos do vermicomposto VRC—STD em
diferentes estágios de maturação: fresco, estável e
maturo.

Figura 13.b — II. Espectros de ¹³C CPMAS-NMR dos HAs extraídos do vermicomposto VRC—L em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo.

HA—L—F

HA—L—S

HA—L—M

HA-A-F

HA-A-S

HA-A-M

Figura 13.c — II. Espectros de ^{13}C CPMAS-NMR dos HAs extraídos do vermicomposto VRC—A em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo.

Figura 13.d — II. Espectros de ^{13}C CPMAS-NMR dos HAs extraídos do vermicomposto VRC—AL em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo.

HA—AL—F

HA—AL—S

HA—AL—M

Figura 13 — II. Espectros de ^{13}C CPMAS-NMR dos HAs extraídos dos vermicompostos VRC—STD, VRC—L, VRC—A e VRC—AL em diferentes estágios de maturação: fresco, estável e maturo.

4.4. GC/MS

Por meio de GC/MS foram quantificadas 41 moléculas, as quais correspondem aos metabólitos primários determinados nos HAs extraídos dos vermicompostos (da Tabela 9 — II à Tabela 12 — II).

Os dados obtidos nos testes de germinação indicaram que os HAs apresentam atividade hormono-similar e que, tanto o tipo de vermicomposto quanto o estágio de maturação desempenharam um papel nesta atividade. No entanto, estes dados são incompletos por não fornecer informações acerca dos mecanismos químicos e bioquímicos e, também, quais moléculas seriam as responsáveis pelo efeito auxino-similar (Scaglia et al., 2015, 2016).

A injeção dos HAs derivatizados, a separação dos metabolitos por GC e a identificação/quantificação por MS, forneceram informações importantes no que se refere à composição química dos HAs. Os resultados indicaram que o processo de vermicompostagem afetou as propriedades bioestimulantes dos HAs. Uma das evidências das transformações químicas ocorridas na MO foi a detecção de moléculas que variaram suas concentrações em função do tempo de maturação. Por exemplo, moléculas que foram quantificadas nos estágios estável ou maturo e que não foram observadas no estágio fresco (ácido maláico, L-serina, xilitol etc.). O mesmo ocorreu com as moléculas que foram quantificadas no estágio fresco e que deixaram de ser detectadas nos estágios seguintes (citosina, ácido quínico, talose etc.).

Quanto à composição dos HAs extraídos dos vermicompostos contendo resíduos de curtume (amostras HA—L, HA—A e HA—AL) foram determinadas, principalmente, as seguintes moléculas: ácido fumárico, ácido galacturônico, ácido 4-hidroxibenzóico, L-(-)-fucose, adenina, D-alose, glicerol-1-fosfato, glicina, L-treonina, maltose, álcool sinapílico, tagatose, ácido tartrônico e ureia.

Em geral, a concentração dos metabólitos foi variando ao longo do tempo, aumentando ou diminuindo, em função do estágio de maturação, provavelmente em função das características químicas dos HAs, tais como sua resistência à degradação microbiológica, estabilidade estrutural etc. e, também, o tipo de amostra (Scaglia et al., 2015, 2016).

Em geral, na amostra HA—STD a concentração dos metabólitos aumentou em até 80% ao longo da vermicompostagem (de fresco à maturo). Os ácidos orgânicos — ácidos carboxílicos de cadeia alifática e aromática — tenderam a diminuir suas concentrações ou não apresentaram diferenças em seus resultados (média $\pm$ DP). Além disso, os HAs extraídos dos vermicompostos contendo resíduos de curtume (amostras HA—L, HA—A e HA—AL) apresentaram uma variação aleatória na concentração de seus metabólitos em função do tempo de maturação. Por exemplo, a amostra HA—A apresentou um aumento na concentração de um único metabólito, o N-acetil-D-manosamina, o qual variou de $1,97 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—A—F a $3,68 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—A—M (μg de composto por g de HAs). Nos demais vermicompostos, as concentrações dos metabólitos variaram aleatoriamente.

D-lixose, H_3PO_4 e glicerol (Gly) foram as moléculas observadas em maior quantidade nos HAs extraídos dos vermicompostos maturos. A molécula determinada em maior concentração foi o H_3PO_4 , $\sim 398 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—STD—M, $\sim 274 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—L—M, $\sim 165 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—A—M e $\sim 249 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—AL—M. Em todos os casos, as concentrações de H_3PO_4 não variaram entre os tempos de maturação (médias $\pm$ erro).

A concentração de D-lixose variou de forma expressiva entre os estágios fresco e maturo, apresentando maior concentração nos HAs da amostra STD, variando dentre $8,21$ - $186,20 \mu\text{g g}^{-1}$. Nas outras amostras a concentração de D-lixose foi de $102,03 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—L—M, $148,36 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—A—M e $104,41 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—AL—M.

Para o Gly, foi observada uma variação significativa entre os estágios de maturação. Nas amostras HA—STD, HA—L e HA—AL foi observado um aumento de seu teor, enquanto que na amostra HA—A ocorreu uma diminuição. As concentrações variaram de $48,37$ a $88,87 \mu\text{g g}^{-1}$ em STD ($\sim 89\%$ de diferença), $73,40$ a $108,32 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—L ($\sim 47\%$), $149,40$ para $80,81 \mu\text{g g}^{-1}$ em HA—A ($\sim 85\%$) e de $86,55$ a $112,88 \mu\text{g g}^{-1}$ para a amostra HA—AL ($\sim 30\%$).

Tabela 9 — II. Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte I: Amostras HA—STD, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\mu\text{g g}^{-1}$ (μg de composto por g de HAs).

Classe	Compostos	HA—STD—F	HA—STD—S	HA—STD—M
AA	Glicina	0	0	0
	L-Serina	0	6,53 $\pm$ 1,03	9,39 $\pm$ 0,33
	Ácido L-Glutâmico	6,21 $\pm$ 0,52	7,84 $\pm$ 1,16	12,12 $\pm$ 1,72
	Ácido L-Piroglutamico	5,71 $\pm$ 1,90	10,38 $\pm$ 0,37	14,28 $\pm$ 1,35
	L-Treonina	0	0	0
Ali—COOH	Ácido Glicólico	12,29 $\pm$ 2,00	11,46 $\pm$ 1,12	13,96 $\pm$ 5,90
	Ácido L-(+)-Lático	0	0	7,97 $\pm$ 0,51
	Ácido Oxálico	7,06 $\pm$ 1,01	10,62 $\pm$ 1,90	17,64 $\pm$ 5,16
	Ácido Fumarico	0	0	0
	Ácido Succínico	6,38 $\pm$ 0,80	5,30 $\pm$ 1,35	0
	Ácido Tartronico	0	0	0
	Ácido Cítrico	15,89 $\pm$ 2,63	19,22 $\pm$ 3,16	28,45 $\pm$ 9,82
CHex—COOH	Ácido Quínico	5,49 $\pm$ 0,67	0	0
Ar—COOH	Ácido 4-Hidroxi-3-metilbenzoico	7,29 $\pm$ 0,50	6,38 $\pm$ 0,66	8,82 $\pm$ 0,44
	Ácido 4-Hidroxibenzoico	0	0	0
	Ácido Ferulico	8,17 $\pm$ 2,51	10,38 $\pm$ 3,24	11,20 $\pm$ 1,32
	Ácido 4-Hidroxicinâmico	18,64 $\pm$ 0,13	21,05 $\pm$ 4,82	24,04 $\pm$ 7,70
	Álcool Sinapílico	0	0	0
α —HH	Ácido Glicerico	17,97 $\pm$ 2,22	16,27 $\pm$ 3,71	20,92 $\pm$ 2,31
	Ácido D-Málico	0	0	0
Poli—OH	Glicerol	48,37 $\pm$ 7,21	88,23 $\pm$ 17,37	88,87 $\pm$ 13,12
	Xilitol	0	0	22,13 $\pm$ 10,14
	Glicerol-1-Fosfato	0	0	0
MS	6-Desoxi-D-Glucose	8,5 $\pm$ 1,05	12,75 $\pm$ 1,76	14,33 $\pm$ 1,04
	D-(+)-Altrose	0	5,54 $\pm$ 16	0
	D-Alose	0	0	0
	D-Glucose	23,64 $\pm$ 2,44	38,89 $\pm$ 6,91	8,21 $\pm$ 0,62

Classe	Compostos	HA—STD—F	HA—STD—S	HA—STD—M
MS	D-Lyxose	8,21 ± 1,10	154,01 ± 16,05	186,20 ± 14,04
	D-Lyxosilamina	0	0	10,16 ± 2,00
	D-Manose	10,11 ± 0,78	43,91 ± 6,18	47,46 ± 0,71
	Ácido Galacturonico	0	0	0
	L-(-)-Fucose	0	0	0
	Maltose	0	0	0
	N-Acetil-D-Manosamina	0	2,38 ± 3,36	0
	Talose	0	9,94 ± 5,54	0
	Tagatose	0	0	0
Nuc	Adenina	0	0	0
	Citosina	8,68 ± 13	0	0
	Timina	13,49 ± 0,45	0	0
Amina	Ureia	0	0	0

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; CHex—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia cíclica (cicloexano); Ar—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática; α—HH alfa-Hidroxiácidos; Poli—OH Poliólcoois; MS Monossacarídeos; Nuc Nucleotídeos. HA—STD Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—STD. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Tabela 10 — II. Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte II: Amostras HA—L, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\mu\text{g g}^{-1}$ (μg de composto por g de HAs).

Classe	Compostos	HA—L—F	HA—L—S	HA—L—M
AA	Glicina	0	0	0
	L-Serina	0,60 $\pm$ 0,85	0	4,56 $\pm$ 0,78
	Ácido L-Glutâmico	8,35 $\pm$ 7,12	3,62 $\pm$ 0,66	4,69 $\pm$ 6,64
	Ácido L-Piroglutamico	9,21 $\pm$ 4,62	1,91 $\pm$ 2,70	8,61 $\pm$ 2,07
	L-Treonina	3,92 $\pm$ 2,77	0	3,36 $\pm$ 0,98
Ali—COOH	Ácido Glicólico	11,72 $\pm$ 1,68	3,64 $\pm$ 0,08	7,70 $\pm$ 2,02
	Ácido L-(+)-Lático	0	1,08 $\pm$ 1,52	2,54 $\pm$ 0,48
	Ácido Oxálico	10,40 $\pm$ 8,99	5,03 $\pm$ 0,06	8,82 $\pm$ 1,28
	Ácido Fumarico	2,38 $\pm$ 3,37	0	2,22 $\pm$ 0,24
	Ácido Succínico	3,01 $\pm$ 2,12	1,74 $\pm$ 0,17	3,07 $\pm$ 0,97
	Ácido Tartrônico	0,90 $\pm$ 1,28	0	1,27 $\pm$ 1,80
	Ácido Cítrico	12,92 $\pm$ 0,95	4,29 $\pm$ 0,21	9,98 $\pm$ 0,76
CHex—COOH	Ácido Quínico	3,85 $\pm$ 0,64	0	2,39 $\pm$ 0,63
Ar—COOH	Ácido 4-Hidroxi-3-metilbenzoico	4,70 $\pm$ 3,70	2,54 $\pm$ 0,04	5,43 $\pm$ 0,87
	Ácido 4-Hidroxibenzoico	1,21 $\pm$ 1,71	0	0,93 $\pm$ 1,31
	Ácido Ferulico	7,17 $\pm$ 5,30	3,88 $\pm$ 0,49	7,41 $\pm$ 1,99
	Ácido 4-Hidroxicinâmico	19,87 $\pm$ 4,01	8,76 $\pm$ 0,12	14,33 $\pm$ 3,13
	Álcool Sinapílico	1,03 $\pm$ 1,46	0	0
α —HH	Ácido Glicerico	7,96 $\pm$ 5,26	5 $\pm$ 0,34	9,65 $\pm$ 2,01
	Ácido D-Málico	1,11 $\pm$ 1,56	0	1,05 $\pm$ 1,49
Poli—OH	Glicerol	149,40 $\pm$ 1,69	127,85 $\pm$ 12,19	80,81 $\pm$ 53,13
	Xilitol	35,08 $\pm$ 2,94	0	4,37 $\pm$ 6,18
	Glicerol-1-Fosfato	1,37 $\pm$ 1,93	0	0
MS	6-Desoxi-D-Glucose	4,31 $\pm$ 0,84	6,03 $\pm$ 0,02	7,72 $\pm$ 3,48
	D-(+)-Altrose	2,46 $\pm$ 0,83	3,69 $\pm$ 0,11	1,49 $\pm$ 2,11
	D-Alose	0	0	0
	D-Glucose	16,11 $\pm$ 3,49	2,75 $\pm$ 0,24	23,98 $\pm$ 8,29

Classe	Compostos	HA—L—F	HA—L—S	HA—L—M
MS	D-Lyxose	72,99 ± 23,57	69,23 ± 0,37	102,03 ± 28,01
	D-Lyxosilamina	1,51 ± 2,14	0	3,24 ± 4,58
	D-Manose	11,97 ± 5,94	12,74 ± 6,53	7,88 ± 11,15
	Ácido Galacturônico	0	0	0
	L-(-)-Fucose	0	0,68 ± 0,96	1,18 ± 1,66
	Maltose	0	0	0
	N-Acetil-D-Manosamina	1,97 ± 0,1	2,35 ± 0,02	3,68 ± 0,97
	Talose	1,02 ± 1,45	2,49 ± 0,04	1,26 ± 1,78
	Tagatose	1,29 ± 1,83	0	4,07 ± 1,10
Nuc	Adenina	1,79 ± 0,5	0	0
	Citosina	2,60 ± 3,67	0	1,11 ± 1,57
	Timina	4,42 ± 3,93	1,01 ± 1,43	2,40 ± 0,83
Amina	Ureia	3,58 ± 1,16	0	3,66 ± 0,66

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; CHex—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia cíclica (cicloexano); Ar—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática; α —HH alfa-Hidroxiácidos; Poli—OH Polialcoois; MS Monossacarídeos; Nuc Nucleotídeos. HA—L Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—L. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Tabela 11 — II. Caracterização dos HAs por GC/MS. Parte III: Amostras HA—A, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\mu\text{g g}^{-1}$ (μg de composto por g de HAs).

Classe	Compostos	HA—A—F	HA—A—S	HA—A—M
AA	Glicina	0	0	0
	L-Serina	0	6,13 $\pm$ 1,86	1,10 $\pm$ 1,55
	Ácido L-Glutâmico	3,41 $\pm$ 0,24	10,73 $\pm$ 5,29	11,01 $\pm$ 0,88
	Ácido L-Piroglutamico	3,52 $\pm$ 0,24	0	11,49 $\pm$ 0,67
	L-Treonina	0	0	0
Ali—COOH	Ácido Glicólico	6,92 $\pm$ 0,52	5,49 $\pm$ 3,08	13,25 $\pm$ 0,04
	Ácido L-(+)-Lático	1,21 $\pm$ 1,64	8,17 $\pm$ 3,23	0
	Ácido Oxálico	11,40 $\pm$ 0,56	4,54 $\pm$ 2,37	20,49 $\pm$ 1,19
	Ácido Fumarico	1,91 $\pm$ 0,24	0	4,41 $\pm$ 0,25
	Ácido Succínico	2,84 $\pm$ 0,18	0	5,33 $\pm$ 0,16
	Ácido Tartronico	0	0	3,27 $\pm$ 0,05
	Ácido Cítrico	12,74 $\pm$ 0,77	0	16,81 $\pm$ 0,24
CHex—COOH	Ácido Quínico	3,22 $\pm$ 1,16	1,87 $\pm$ 2,64	4,28 $\pm$ 1,56
Ar—COOH	Ácido 4-Hidroxi-3-metilbenzoico	4,41 $\pm$ 0,60	3,53 $\pm$ 1,19	8,24 $\pm$ 0,57
	Ácido 4-Hidroxibenzoico	0	0	4,23 $\pm$ 0,51
	Ácido Ferulico	10,61 $\pm$ 0,97	4,69 $\pm$ 2,84	15,06 $\pm$ 0,75
	Ácido 4-Hidroxicinâmico	19,50 $\pm$ 0,10	10,85 $\pm$ 4,40	23,87 $\pm$ 3,38
	Álcool Sinapílico	0	0	1,36 $\pm$ 1,93
α —HH	Ácido Glicerico	9,23 $\pm$ 0,44	9,40 $\pm$ 3,06	16,94 $\pm$ 0,39
	Ácido D-Málico	0	0	1,12 $\pm$ 1,58
Poli—OH	Glicerol	73,4 $\pm$ 5,48	56,94 $\pm$ 45,06	108,32 $\pm$ 1,54
	Xilitol	0	0	0
	Glicerol-1-Fosfato	2,4 $\pm$ 0,23	0	4,14 $\pm$ 0,01
MS	6-Desoxi-D-Glucose	3,21 $\pm$ 4,52	10,26 $\pm$ 2,74	16,33 $\pm$ 0,10
	D-(+)-Altrose	2,20 $\pm$ 0,14	5,16 $\pm$ 1,39	45,66 $\pm$ 2,21
	D-Alose	0	0	2,92 $\pm$ 0,24
	D-Glucose	17,6 $\pm$ 0,53	17,81 $\pm$ 9,10	34,94 $\pm$ 6,98

Classe	Compostos	HA—A—F	HA—A—S	HA—A—M
MS	D-Lyxose	106,75 ± 1,05	100,04 ± 29,03	148,36 ± 34,33
	D-Lyxosilamina	2,82 ± 3,97	0	4,87 ± 6,88
	D-Manose	3,31 ± 0,07	2,60 ± 3,68	22,93 ± 0,63
	Ácido Galacturônico	0	0	0
	L-(-)-Fucose	0	0	4,16 ± 0,03
	Maltose	2,73 ± 0,33	0	4,45 ± 0,92
	N-Acetil-D-Manosamina	2,92 ± 0,41	3,54 ± 1,43	6,86 ± 0,92
	Talose	1,30 ± 1,80	3,51 ± 0,52	5,47 ± 2,42
	Tagatose	1,00 ± 1,38	0	1,24 ± 1,76
Nuc	Adenina	3,25 ± 0,33	0	0,89 ± 1,26
	Citosina	6,17 ± 0,60	0	3,04 ± 0,09
	Timina	10,72 ± 0,14	0	1,11 ± 1,57
Amina	Ureia	0	3,25 ± 4,61	2,36 ± 0,14

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; CHex—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia cíclica (cicloexano); Ar—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática; α -HH alfa-Hidroxiácidos; Poli—OH Polialcoois; MS Monossacarídeos; Nuc Nucleotídeos. HA—A Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—A. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Tabela 12 — II. Caracterização dos HAS por GC/MS. Parte IV: Amostras HA—AL, em diferentes estágios de maturação, fresco, estável e maturo (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco). Unidades em $\mu\text{g g}^{-1}$ (μg de composto por g de HAS).

Classe	Compostos	HA—AL—F	HA—AL—S	HA—AL—M
AA	Glicina	0	0	1,73 $\pm$ 0,35
	L-Serina	0	0	2,51 $\pm$ 0,51
	Ácido L-Glutâmico	7,77 $\pm$ 0,63	3,30 $\pm$ 1,04	7,10 $\pm$ 1,43
	Ácido L-Pirolutâmico	8,06 $\pm$ 0,54	3,30 $\pm$ 2,01	0
	L-Treonina	0	0	0
Ali—COOH	Ácido Glicólico	8,18 $\pm$ 0,43	4,21 $\pm$ 0,31	7,25 $\pm$ 1,46
	Ácido L-(+)-Lático	1,42 $\pm$ 2,01	35,65 $\pm$ 43	2,44 $\pm$ 0,49
	Ácido Oxálico	12,60 $\pm$ 1,28	8,48 $\pm$ 1,01	14,11 $\pm$ 2,85
	Ácido Fumarico	2,92 $\pm$ 0,50	1,84 $\pm$ 1,00	2,39 $\pm$ 0,48
	Ácido Succínico	3,48 $\pm$ 0,01	1,95 $\pm$ 0,50	3,49 $\pm$ 0,70
	Ácido Tartrônico	0	0	2,86 $\pm$ 0,58
	Ácido Cítrico	21,06 $\pm$ 1,73	9,91 $\pm$ 2,30	13,26 $\pm$ 2,68
CHex—COOH	Ácido Quínico	1,38 $\pm$ 1,96	3,77 $\pm$ 0,20	2,66 $\pm$ 0,54
Ar—COOH	Ácido 4-Hidroxi-3-metilbenzoico	5,96 $\pm$ 0,26	3,81 $\pm$ 0,80	5,92 $\pm$ 1,21
	Ácido 4-Hidroxibenzoico	0	0	2,20 $\pm$ 0,44
	Ácido Ferulico	7,3 $\pm$ 0,53	8,75 $\pm$ 0,82	8,39 $\pm$ 1,7
	Ácido 4-Hidroxicinâmico	16,91 $\pm$ 0,82	19,13 $\pm$ 2,81	20,26 $\pm$ 4,09
	Álcool Sinapílico	0	0	1,68 $\pm$ 0,34
α —HH	Ácido Glicerico	11,61 $\pm$ 0,80	5,68 $\pm$ 0,81	8,59 $\pm$ 1,73
	Ácido D-Málico	0	0	0
Poli—OH	Glicerol	86,55 $\pm$ 26,85	70,96 $\pm$ 13,9	112 $\pm$ 22
	Xilitol	0	0	0
	Glicerol-1-Fosfato	0	0	2,22 $\pm$ 0,45
MS	6-Desoxi-D-Glucose	6,19 $\pm$ 8,76	4,65 $\pm$ 0,51	7,58 $\pm$ 1,53
	D-(+)-Altrose	5,08 $\pm$ 0,37	1,73 $\pm$ 0,05	3,16 $\pm$ 0,64
	D-Alose	0	0	2,02 $\pm$ 0,41
	D-Glucose	22,02 $\pm$ 0,04	2,65 $\pm$ 0,55	18,91 $\pm$ 3,82

Classe	Compostos	HA—AL—F	HA—AL—S	HA—AL—M
MS	D-Lyxose	121,44 ± 1,47	95,03 ± 15,5	104,41 ± 21,09
	D-Lyxosilamina	0	0	5,33 ± 1,08
	D-Manose	15,77 ± 0,29	1,8 ± 0,4	4,03 ± 0,82
	Ácido Galacturônico	0	0	1,87 ± 0,38
	L-(-)-Fucose	1,26 ± 1,78	0	1,74 ± 0,35
	Maltose	0	0	0
	N-Acetil-D-Manosamina	4,42 ± 0,02	0	2,44 ± 0,49
	Talose	2,30 ± 3,25	0	0
	Tagatose	0	0	1,92 ± 0,39
Nuc	Adenina	0	3,05 ± 0,90	2,92 ± 0,59
	Citosina	1,59 ± 2,24	4,58 ± 0,06	1,74 ± 0,35
	Timina	5,62 ± 0,03	6,68 ± 2,60	5,34 ± 1,08
Amina	Ureia	0	0	1,64 ± 0,33

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; CHex—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia cíclica (cicloexano); Ar—COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática; α—HH alfa-Hidroxiácidos; Poli—OH Poliólcoois; MS Monossacarídeos; Nuc Nucleotídeos. HA—AL Ácidos húmicos extraídos do vermicomposto VRC—AL. F Vermicomposto fresco; S Vermicomposto estável; M Vermicomposto maturo.

Para facilitar a compreensão dos dados, os metabólitos determinados via GC/MS foram reclassificados em classes principais de compostos orgânicos (Figura 14 — II), a saber:

- i. Aminoácidos
- ii. Ácidos carboxílicos de cadeia alifática
- iii. Ácidos carboxílicos de cadeia aromática
- iv. α —Hidroxiácidos
- v. Poliólcoois
- vi. Monossacarídeos
- vii. Ácidos carboxílicos de cadeia cíclica (cicloexano)⁴
- viii. Nucleotídeos⁴

Em particular, os ácidos carboxílicos — ambos, lineares e aromáticos — e os aminoácidos têm sido reportados em diversos estudos por apresentarem efeitos auxino-similares semelhantes, e serão o foco das discussões neste estudo (Colla et al., 2014; Ertani et al., 2013; Singh et al., 2013; Trevisan et al., 2010; Ferro et al., 2006; Pizzeghello et al., 2006).

Quanto às demais classes de compostos orgânicos, a concentração dos α —hidroxiácidos se manteve baixa em todas as amostras, $\sim 16 \mu\text{g g}^{-1}$, variando pouco entre as amostras analisadas. Já a concentração de monossacarídeos se manteve elevada, variando entre 120,33-178,86 $\mu\text{g g}^{-1}$, com algumas exceções. Já a concentração de poliólcoois variou de forma aleatória.

Em resumo, a composição química dos HAs (da Tabela 9 — II à Tabela 12 — II) não nos permite compreender por completo o efeito bioestimulante dos HAs, quer pela complexidade dos mecanismos e vias metabólicas, quer pela quantidade de moléculas envolvidas.

Estudos recentes têm relatado que apenas a presença de certas moléculas não é suficiente para inferir, de forma satisfatórias, acerca dos efeitos bioestimulantes dos HAs, uma vez que a concentração molecular e a biodisponibilidade também desempenham papéis importantes na atividade hormono-similar de um composto orgânico (Colla et al., 2014; Dobbss et al., 2010; Pizzeghello et al., 2006).

Contudo, tendo em conta a concentração total das moléculas que compõem os HAs, a concentração total das moléculas bioativas reportadas na literatura (ácidos carboxílicos e aminoácidos) e, principalmente, os dados da atividade auxino-similar, as amostras estudadas foram sub-divididas em duas classes:

- i. HAs que apresentaram bioatividade (Figura 15 — II)
Amostras: HA—STD—S, HA—STD—M, HA—A—M, HA—AL—F, HA—AL—S e HA—AL—M.
Concentração total de moléculas: 95,65 – 148,01 $\mu\text{g g}^{-1}$
Concentração de moléculas bioativas: $114,8 \pm 23,3 \mu\text{g g}^{-1}$
- ii. HAs que não apresentaram bioatividade (Figura 16 — II)
Amostras: HA—STD—F, HA—L—F, HA—L—S, HA—L—M, HA—A—F e HA—A—S.
Concentração total de moléculas: 36,48 – 97,39 $\mu\text{g g}^{-1}$
Concentração de moléculas bioativas: $73,2 \pm 23,1 \mu\text{g g}^{-1}$

⁴ Classe de compostos determinados em pequena quantidade, com concentrações somadas em valores próximos a $\sim 10 \mu\text{g g}^{-1}$.

Analisando as concentrações obtidas, nota-se que a diferença entre as moléculas bioativas em ambos os grupos, HAs bioativos e sem bioatividade, foi de ~ 53%. Além disso, os dois grupos apresentaram concentrações estatisticamente diferentes (One-way, $P < 0,05$), sugerindo que quanto maior a concentração de moléculas bioativas, maior a atividade bioestimulante dos HAs. Esta hipótese foi corroborada pelo ajuste linear adequado (Equação 1 — II), calculado entre o coeficiente angular da atividade auxino-similar (Tabela 2 — II) e a concentração de moléculas bioativas: aminoácidos (AA), ácidos carboxílicos de cadeia alifática (Ali—COOH) e ácidos carboxílicos de cadeia aromática (Ar—COOH); que são parâmetros lineares.

$$\text{Efeito auxino similar} = [3,16 \times (\text{AA} + \text{Ali—COOH} + \text{Ar—COOH})] - 0,046 \quad (\text{Equação 1 — II})$$

$$R^2 = 0,85 ; P < 0,01 ; n = 6$$

Resumindo, os resultados indicaram que o processo de vermicompostagem afetou as propriedades bioestimulantes dos HAs. Nota-se que os efeitos observados nos vermicompostos maduros foram mais acentuados que nos demais estágios de maturação, principalmente ao notar que as amostras mais bioativas apresentam maior concentração de moléculas com efeito bioestimulante (Figura 15— II).

Em geral, os compostos orgânicos da classe dos ácidos carboxílicos, alifáticos ou aromáticos, foram as concentrações determinadas em maior quantidade: alifáticos entre 54,87-102,16 $\mu\text{g g}^{-1}$ e aromáticos entre 89,86-145,68 $\mu\text{g g}^{-1}$ nas amostras bioativas. Considerando que a concentração mais alta de um composto bioativo em uma amostra sem atividade hormono-similar foi de 96,02 $\mu\text{g g}^{-1}$, referente aos ácidos carboxílicos de cadeia aromática na amostra HA—L—F, considera-se que esta concentração é o limite acima do qual o efeito bioestimulante dos HAs se inicia.

Figura 14 — II. Concentrações das classes de compostos orgânicos determinados nos HAs de vermicompostos, em diferentes estágios de maturação, via GC/MS.

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; CHex-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia cíclica (cicloexano); Ar-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática; alfa-HH alfa-Hidroxiácidos; Poli-OH Poliólcoois; MS Monossacarídeos; Nuc Nucleotídeos.
UNIDADE: µg g⁻¹ (µg de composto por g de HAs).

Figura 15 — II. Concentrações das classes de compostos orgânicos determinados nos HAs com bioatividade via GC/MS.

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; Ar-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática.
UNIDADE: $\mu\text{g g}^{-1}$ (μg de composto por g de HAs).

Figura 16 — II. Concentrações das classes de compostos orgânicos determinados nos HAs sem bioatividade via GC/MS.

LEGENDA: AA Aminoácidos; Ali-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia alifática; Ar-COOH Ácidos carboxílicos de cadeia aromática.
UNIDADE: $\mu\text{g g}^{-1}$ (μg de composto por g de HAs).

5. DISCUSSÃO

5.1. Testes de germinação e bioatividade

Por meio dos testes de germinação com sementes de *L. sativa*, foi observado que tanto os extratos de HAs como os de DOM apresentaram atividade hormono-similar, referentes ao efeito auxino-similar. Porém, este efeito foi muito mais acentuado nos ensaios com HAs. Nestas análises, o crescimento das raízes foi completamente inibido nos testes com soluções mais concentradas (4000,0 e 6000,0 mg C L⁻¹). Já nos testes utilizando a DOM, os resultados observados não foram tão significativos, apenas inibindo o crescimento em soluções mais concentradas (4000,0 mg C L⁻¹).

Os teores dos HAs e da DOM determinados nos vermicompostos, além de suas composições químicas, podem ter influenciado os resultados obtidos nos testes de germinação, uma vez que estes extratos atuam diretamente na germinação das sementes e no desenvolvimento dos organismos vegetais, por meio de processos metabólicos que são regulados por biomoléculas, minerais etc. ali contidos.

No que se refere a quantidade de HAs encontrados nos vermicompostos (amostras VRC), em diferentes estágios de maturação, os resultados obtidos estão de acordo com os dados observados na literatura (Ertani et al., 2013; Salati et al., 2011; Trevisan et al., 2010; Landgraf et al., 1998).

Salati et al. (2011) desenvolveram um estudo com HAs de diferentes tipos de biomassa e reportaram uma concentração semelhante ao reportado neste estudo, $90,0 \pm 38,0$ g kg⁻¹. Porém, um estudo publicado por Landgraf et al. (1998) apresentou um valor inferior, apenas $38,0 \pm 0,0$ g kg⁻¹ de HAs em vermicompostos produzidos a partir de esterco bovino. Conforme discutido no Capítulo I, amostras de origem biológica tendem a apresentar valores diferentes de seus constituintes químicos e, na maioria das vezes, não permitem uma comparação direta de resultados entre amostras do mesmo tipo.

Não foram encontrados na literatura outros trabalhos que comparem as atividades hormono-similares da DOM e HAs de uma mesma matriz. Sendo assim, não é possível estabelecer um paralelo entre os resultados obtidos neste estudo com outros da mesma natureza.

No que se refere aos resultados obtidos nos testes de germinação com sementes de *L. sativa* utilizando HAs em diferentes concentrações, os resultados obtidos estão de acordo com a literatura (Scaglia et al., 2015; Ertani et al., 2013; Singh et al., 2013; Trevisan et al., 2010). Ertani et al. (2013) demonstraram que os HAs podem influenciar positivamente as plantas, apresentando um efeito auxino-similar, observado a partir da inibição do crescimento das raízes. Nestes testes, os melhores resultados foram obtidos ao tratar sementes de milho *Zea mays* com 0,1 mL L⁻¹ de HAs extraídos de digestato e resíduos de linho *Linum usitatissimum* L. ou 1,0 mL L⁻¹ de HAs extraídos dos resíduos da extração do óleo de colza *Brassica napus* L., também com sementes de milho. Em ambos os casos, os resultados foram semelhantes aos dados obtidos nesse estudo.

Scaglia et al. (2015) observaram o efeito auxino-similar em testes com doses estimulantes da fração hidrofóbica neutra extraída de MO de compostos de esterco e, também, de digestato. As concentrações aplicadas variaram entre doses de 10,0 a 200,0 mg C L⁻¹, promovendo a inibição da germinação e o crescimento das raízes.

Testes biológicos que avaliam a ação de hormônios vegetais — ou moléculas de ação similar — se baseiam na ação de compostos orgânicos que desempenham uma função específica no metabolismo de organismos vegetais. No caso do efeito auxino, desempenhado pelo AIA, a ação esperada é a promoção do crescimento das raízes e suporte à germinação das sementes. Contudo, quando expostas a altas dosagens, tais compostos se tornam tóxicos às sementes, inibindo o desenvolvimento das raízes ou bloqueando completamente as rotas metabólicas que levariam à germinação das sementes. Assim, neste tipo de bioensaio, avalia-se a presença de determinada substância — ou conjunto de substâncias, é o caso dos HAs e da DOM — em função da sensibilidade das sementes à sua exposição. Neste sentido, a sensibilidade acusaria a presença ou não de tais compostos super-dosados, conforme foi observado nos HAs extraídos dos vermicompostos.

Considera-se linear a relação entre a quantidade de compostos com ação hormono-similar e o efeito auxino-similar: quanto mais compostos bioativos houver, mais intenso será o efeito observado. Esta relação está relacionada também à qualidade dos vermicompostos, uma vez que quanto mais intensa a atividade hormono-similar, maior será seu benefício às plantas. Contudo, para que a quantidade HAs seja proporcional a qualidade do vermicomposto é necessário que estes sejam, também, de qualidade. A qualidade de um vermicomposto, no que se refere aos seus HAs, está relacionada a atividade hormono-similar, ao seu grau de maturação, além de outros parâmetros, como a capacidade de retenção de metais, umidade etc.

De acordo com os dados apresentados, foi observado que o grau de maturação interferiu no efeito auxino-similar. Conforme o esperado, o efeito auxino-similar aumentou com o tempo de maturação — uma consequência das transformações ocorridas na MO. O fato de alguns tratamentos apresentarem atividade bioestimulante apenas no estágio maturo reforça a ideia de que a MO se degrada e se transforma ao longo do tempo, dando origem a novos compostos e moléculas, diferenciados, com uma capacidade estimulante que não era até então observada ou com ação biológica significativa.

Além disso, os resultados obtidos nos testes de germinação com os HAs extraídos do vermicomposto controle (amostra HA—STD) servem de referência para que se possa inferir sobre o efeito da adição dos resíduos de curtume na vermicompostagem para fins agrícolas e seu efeito na ação hormono-similar dos vermicompostos. Nesta amostra, o efeito auxino-similar observado foi o esperado: aumentou em função do estágio de maturação. Apenas os estágios S e M (HA—STD—S e HA—STD—M) apresentaram função auxino-similar, com significância crescente em função do tempo. Ao comparar estes dados com as amostras contendo resíduos de curtume (HA—L, HA—A e HA—AL), conclui-se que a adição dos resíduos alterou a composição dos HAs e, conseqüentemente, sua bioatividade.

No caso do lodo de curtume, a influência foi negativa, nenhuma amostra (HA—L—F, HA—L—S e HA—L—M) apresentou ação hormono-similar (efeito auxino-similar). Já nos testes com os HAs dos vermicompostos contendo aparas e raspas curtidas, o efeito observado foi o mesmo que na amostra controle (HA—A—F não-bioativo, HA—A—S e HA—A—M bioativos). No caso da mistura de lodo e aparas, a influência foi positiva, todos os HAs de todos os estágios apresentaram-se bioativos (HA—AL—F, HA—AL—S e HA—AL—M). As amostras HA—A e HA—AL foram as que apresentaram resultados superiores e mais significativos, estatisticamente comprovados.

Conforme citado no Capítulo I, a qualidade dos vermicompostos varia em função da matriz e, também, foi citado que algumas amostras tendem a apresentar resultados superiores (atributos químicos e de fertilidade). Estes dados corroboraram com os dados obtidos no Capítulo II. Os vermicompostos de melhor qualidade foram, também, os que apresentaram os melhores resultados nos testes de germinação.

5.2. Caracterização dos HAs

As técnicas analíticas e espectroscópicas, ^{13}C CPMAS-NMR e GC/MS, foram aplicadas a fim de entender os caminhos das transformações da MO, da maturação dos HAs e suas consequências na atividade hormono-similar — efeito auxino-similar.

Em geral, a técnica de ^{13}C CPMAS-NMR não apresentou resultados que suportassem conclusões significativas que, por sua vez, justificassem os resultados observados nos testes de germinação.

Mesmo sem apresentar resultados conclusivos sobre as transformações ocorridas na composição química dos vermicompostos, os resultados apresentados são semelhantes aos estudos publicados por Ertani et al. (2013), Martinez-Balmori et al. (2014) e Tambone et al. (2013). Não é possível saber, exatamente, a razão pela qual os espectros de NMR são tão semelhantes. Provavelmente deveu-se à composição dos vermicompostos, os quais eram constituídos de resíduos em proporções semelhantes. Mesmo sendo uniforme, a composição do esterco pode ter interferido ou mascarado os possíveis resultados diferenciados. Além disso, pode-se concluir que as frações de HAs observadas já estavam presentes nos vermicompostos antes mesmo do início do processo de vermicompostagem (Tabela 1 — II), sendo preservadas ao longo das

transformações da MO e, portanto, foram apenas concentradas, como consequência da degradação da MO mais lábil (Adani et al., 1997).

Ja a técnica de GC/MS foi útil e importante na análise e interpretação dos dados obtidos nos testes de germinação. Devido à complexidade dos HAs e seus componentes, os quais influenciam no metabolismo das células vegetais em vários níveis, não é possível determinar um único metabolito como sendo o responsável pelos diferentes resultados observados nos testes germinação. No entanto, a técnica de GC/MS foi útil ao determinar quais seriam os componentes majoritários presentes nos HAs e, também, aqueles que provavelmente apresentaram maior efeito bioestimulante na inibição das raízes durante os bioensaios com *L. sativa*.

Os resultados obtidos indicaram uma presença significativa de glicerol (Gly) e outras moléculas que participam de suas vias metabólicas, é o caso do ácido fosfórico e os produtos da reação entre o Gly + H₃PO₄.

Hu et al. (2014) demonstraram em seus estudos o papel bioestimulante do Gly, eficaz na inibição do crescimento da raiz em testes de germinação. O Gly atua nos rearranjos do citoesqueleto durante a indução da embriogênese somática e reprime o catabolismo dos principais fosfolipídios, facilitando a sua síntese. Além disso, o Gly é um precursor de glicerol-3-fosfato (G3P), que é um metabolito-chave no transporte de agentes redutores a partir do citosol, para a mitocôndria, atuando em sua fosforilação. O metabolismo do Gly e do G3P envolvem diversas enzimas-chave: cinase, glicerol desidrogenase, G3P desidrogenase (GPDH) etc. As moléculas de GPDH regeneram o G3P para que seja consumido o DHAP e NADH. Assim, as plantas super-acumulam o G3P e, como consequência, impedem a germinação das sementes e o desenvolvimento das raízes (Hu et al., 2014; Yu et al., 2013).

A dinâmica que envolve o Gly, G3P e o ácido fosfórico foi observada nas amostras que apresentaram melhor resultado nos testes de germinação. Por exemplo, na amostra HA—A o teor de gly diminuiu consideravelmente (de 149,40 para 80,81 µg g⁻¹), indicando sua bioconversão em outras moléculas de ação inibitória. Por outro lado, as amostras que não apresentaram ação hormono-similar (em particular as amostras HA—L) elevaram seus teores de Gly ao longo da vermicompostagem. Já nas amostras HA—AL a concentração de Gly aumentou pouco, porém com valores iguais (média ± STD) entre os estágios de maturação. Neste caso, outros fatores podem ter influenciado.

No mais, além do mecanismo acima citado, outro fato de grande relevância é a composição dos HAs em função dos grupos de moléculas que os compõem. Como citado nos resultados, a presença de ácidos carboxílicos aromáticos foi um diferencial na bioatividade dos HAs. Por não existir um mecanismo biológico (via metabólica) único para uma classe inteira de moléculas, não é possível saber quais moléculas atuam a mais ou a menos nos processos que levam à germinação das sementes.

Em geral, um aumento nas concentrações de monossacarídeos, aminoácidos e ácidos orgânicos ocorreu como consequência da atividade de biodegradação dos constituintes da MO ao longo do processo de vermicompostagem. Em resumo, a degradação de açúcares complexos eleva a quantidade de monossacarídeos; a degradação de proteínas aumenta os níveis de aminoácidos; e, no caso dos ácidos orgânicos, são produtos da oxidação de compostos orgânicos alcóolicos ou de outra natureza orgânica. Contudo, essa lógica variou entre os estágios de maturação e não entre amostras bioativas ou não.

De acordo com Trevisan et al. (2010), a elevada presença de grupos carboxílicos na estrutura dos HAs está correlacionada com seu efeito auxino-similar. Além disso, a eficácia desta ação estaria diretamente associada com a concentração de ácidos carboxílicos aromáticos específicos — grupos fenólicos, tais como o ácido 4-hidroxibenzóico, ácido 4-hidroxicinâmico, ácido protocatecuico, ácido ferúlico, e vanilina (Singh et al., 2013; Ferro et al., 2006; Pizzeghello et al., 2006). De acordo com Ertani et al. (2009) e Colla et al. (2014) o efeito auxino-similar dos aminoácidos pode ser forte ou fraco, sendo mais dependente da concentração de triptofano (metabólico precursor da AIA) que da concentração dos próprios aminoácidos.

Em geral, os resultados reportados neste estudo estão de acordo com outros trabalhos já publicados pelo mesmo grupo de pesquisa. Por exemplo, Scaglia et al. (2015) obtiveram um total de 71 moléculas em um estudo semelhante, no

qual foi analisada a composição química de HAs obtidos da fração hidrofóbica neutra extraída da MO de amostras de compostos de esterco. Além disso, foram determinadas quantidades elevadas de D-xilose e Gly. Foram quantificados 155,0 $\mu\text{g g}^{-1}$ de Gly em um extrato hidrofílico de digestato, também analisados por CG/MS. Os valores de Gly reportados por Scaglia et al. (2015) ficaram acima do observado nesse estudo, em que os resultados variaram entre 80,0-112,0 $\mu\text{g g}^{-1}$. Já a D-lixose foi o aminoácido encontrado em maior quantidade (17,20 $\mu\text{g g}^{-1}$), abaixo do menor valor observado nesse estudo (101,92 $\mu\text{g g}^{-1}$, amostra HA—A—M).

6. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO II

Os dados apresentados neste segundo capítulo suportam as seguintes conclusões:

- i.* O presente estudo confirma que os HAs e a DOM obtidos a partir de vermicompostos, em diferentes estágios de maturação, podem apresentar atividade hormono-similar, referente ao efeito auxino-similar;
 - ii.* Embora a DOM apresente atividade hormono-similar, o efeito observado é consideravelmente menor que os resultados obtidos nos testes com os HAs;
 - iii.* O tempo de vermicompostagem interfere na bioatividade dos HAs. O efeito auxino-similar aumenta com o tempo de maturação, como consequência das transformações ocorridas na MO;
 - iv.* Em geral, os vermicompostos maduros (M) tendem a apresentar efeito auxino-similar. Apenas os HAs da amostra VRC—L não apresentam bioatividade no estágio maduro, nem tampouco nos demais estágios de maturação;
 - v.* Vermicompostos frescos (F) não apresentam efeito auxino-similar — exceto o vermicomposto VRC—A, o qual é bioativo em todos os seus estágios de maturação;
 - vi.* Por meio da técnica ^{13}C CPMAS-NMR conclui-se que as frações húmicas já estavam presentes nos resíduos frescos antes mesmo do início do processo de vermicompostagem, sendo preservadas ao longo das transformações da MO e, portanto, foram apenas concentradas, como consequência da degradação da MO mais lábil;
 - vii.* Por meio da técnica GC/MS é possível determinar os metabólitos primários presentes em maior quantidade nos HAs. Estas moléculas, provavelmente, são as mais bioestimulante com vistas ao efeito auxino-similar. Destaque para o glicerol (Gly) e outras moléculas que participam de suas vias metabólicas, é o caso do ácido fosfórico e os produtos da reação entre o Gly e o H_3PO_4 ;
 - viii.* A composição química dos HAs não permite compreender por completo seu efeito bioestimulante, quer pela complexidade dos mecanismos e vias metabólicas, quer pela concentração de moléculas envolvidas. Ao dividir os compostos em classes, é possível observar quais apresentam maior efeito na bioatividade dos HAs. É o caso dos monossacarídeos, os ácidos carboxílicos de cadeia alifática e, principalmente, os de cadeia aromática;
 - ix.* Considerando que a concentração mais alta de um composto bioativo em uma amostra sem atividade hormono-similar foi de $96,02 \mu\text{g g}^{-1}$, referente aos ácidos carboxílicos de cadeia aromática na amostra HA—L—F, considera-se que esta concentração é o limite acima do qual o efeito bioestimulante dos HAs se inicia; e
 - x.* Conforme citado desde o Capítulo I, a qualidade dos vermicompostos varia entre as amostras e tipos de mistura de resíduos frescos. Os dados apresentados neste capítulo corroboram com os dados apresentados no Capítulo I. Os vermicompostos de melhor qualidade (atributos químicos e de fertilidade — dados do Capítulo I) são, também, os mais bioativos, no que se refere à atividade hormono-similar (efeito auxino-similar).
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADANI, F.; GENEVINI, P.; GASPERI, F.; ZORZI, G. Organic Matter Evolution Index (OMEI) as a measure of composting efficiency. **Compost Science & Utilization**, v. 5, n. 2, p. 53–62, 1997.
- ADANI, F.; GENEVINI, P. L.; GASPERI, F.; TAMBONE, F. Composting and humification. **Compost Science & Utilization**, v. 7, n. 1, p. 24–33, 1999.
- ALONSO, J. M.; ECKER, J. R. The ethylene pathway: a paradigm for plant hormone signaling and interaction. **Science's STKE: Signal Transduction Knowledge Environment**, v. 2001, n. 70, p. 1-11, 2001.
- BROOKS, P. D.; MCKNIGHT, D. M.; BENCALA, K. E. The relationship between soil heterotrophic activity, soil dissolved organic carbon (DOC) leachate, and catchment-scale DOC export in headwater catchments. **Water Resources Research**, v. 35, n. 6, p. 1895–1902, 1999.
- BURDON, J. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 752–769, 2001.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A. **Humosfera**. Campos dos Goytacazes: CCTA/UENF, 2005. 309 p.
- CHANTIGNY, M. H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. **Geoderma**, v. 113, n. 3, p. 357–380, 2003.
- CHEN, Y.; AVIAD, T. Effects of humic substances on plant growth. In: MACCARTHY, P.; MACCARTHY, P.; CAPP, C. E.; MALCOLM, R. L.; BLOOM, P. R. (Ed.). **Humic substances in soil and crop sciences**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 161–186.
- COLLA, G.; ROUPHAEL, Y.; CANAGUIER, R.; SVECOVA, E.; CARDARELLI, M. Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 448, 2014.
- CUNHA, T. J.; MONTEIRO, ALESSANDRA MENDES, S.; GIONGO, V. Matéria orgânica do solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 273–290.
- D'IMPORZANO, G.; ADANI, F. The contribution of water soluble and water insoluble organic fractions to oxygen uptake rate during high rate composting. **Biodegradation**, v. 18, n. 1, p. 103–113, 2006.
- DAVIES, P. J. **Plant hormones biosynthesis, signal transduction, action!**. Dordrecht: Kluwer, 2007. 801 p.
- DELL'AGNOLA; NARDI, S. Hormone-like effect and enhanced nitrate uptake induced by depolycondensed humic fractions obtained from *Allolobophora rosea* and *A. caliginosa* faeces. **Biology and Fertility of Soils**, v. 4, p. 115–118, 1987.
- DOBBSS, L. B.; CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; AGUIAR, N. O.; PERES, L. E. P.; AZEVEDO, M.; SPACCINI, R.; PICCOLO, A.; FAÇANHA, A. R. Bioactivity of chemically transformed humic matter from vermicompost on plant root growth. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 6, p. 3681-3688, 2010.
- EDWARDS, C. A. Earthworms, soil fertility and plant growth. In: WORKSHOP ON THE ROLE OF EARTHWORMS IN THE STABILIZATION OF ORGANIC RESIDUES, 1., 1980, Michigan. **Anais...** Kalamazoo: Beech Leaf Press, 1980. p. 61-85.

- EDWARDS, C. A. Utilization of earthworm compost as plant growth media. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL AND ENVIRONMENTAL PROSPECTS IN EARTHWORM FARMING, 1., 1983, Roma. **Anais...** Roma: Tipolitografia Euromodena, 1983. p. 57-66.
- ERTANI, A.; CAVANI, L.; PIZZEGHELLO, D.; BRANDELLERO, E.; ALTISSIMO, A.; CIAVATTA, C.; NARDI, S. Biostimulant activity of two protein hydrolyzates in the growth and nitrogen metabolism of maize seedlings. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 2, p. 237–244, 2009.
- ERTANI, A.; PIZZEGHELLO, D.; BAGLIERI, A.; CADILI, V.; TAMBONE, F.; GENNARI, M.; NARDI, S. Humic-like substances from agro-industrial residues affect growth and nitrogen assimilation in maize (*Zea mays* L.) plantlets. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 129, p. 103–111, 2013.
- ESSINGTON, M. E. **Soil and water chemistry: an integrative approach**. Boca Raton: CRC, 2004. 534 p.
- FERRI, M. G. **Botânica: morfologia interna das plantas**. São Paulo: Melhoramentos, 1981. 113 p.
- FERRO, N.; GALLEGOS, A.; BULTINCK, P.; JACOBSEN, H. J.; CARBÓ-DORCA, R.; REINARD, T. Coulomb and overlap self-similarities: a comparative selectivity analysis of structure – function relationships for auxin-like molecules. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 46, n. 4, p. 1751–1762, 2006.
- HOPP, H.; SLATER, C. S. The effect of earthworms on the productivity of agricultural soil. **Journal of Agriculture Research**, v. 78, p. 325–339, 1949.
- HU, J.; ZHANG, Y.; WANG, J.; ZHOU, Y. Glycerol affects root development through regulation of multiple pathways in arabidopsis. **PLoS One**, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2014.
- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452 p.
- KORASICK, D. A.; ENDERS, T. A.; STRADER, L. C. Auxin biosynthesis and storage forms. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 9, p. 2541–55, 2013.
- KUCERA, B.; COHN, M. A.; LEUBNER-METZGER, G. Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. **Seed Science Research**, v. 15, n. 4, p. 281–307, 2005.
- LANDGRAF, M. D.; DA SILVA, S. C.; DE, M. O. Mechanism of metribuzin herbicide sorption by humic acid samples from peat and vermicompost. **Analytica Chimica Acta**, v. 368, n. 1–2, p. 155–164, 1998.
- LANDGRAF, M. D.; MESSIAS, R. A.; REZENDE, M. O. O. **A importância ambiental da vermicompostagem: vantagens e aplicações**. São Carlos: Rima, 2005. 106 p.
- LEHN, J. M. **Design of organic complexing agents: strategies towards properties**. Berlim: Springer, 1973. 69 p.
- LEHN, J. M. Cryptates: inclusion complexes of macropolycyclic receptor molecules. **Pure and Applied Chemistry**, v. 50, n. 9–10, p. 871–892, 1978.
- LEHN, J. M. **Supramolecular Chemistry: concepts and perspectives**. New York: John Wiley, 1996. 281 p.
- LOMBARDI, A. T.; JARDIM, W. F. Fluorescence spectroscopy of high performance liquid chromatography fractionated marine and terrestrial organic materials. **Water Research**, v. 33, n. 2, p. 512–520, 1999.
-

- MARTINEZ-BALMORI, D.; SPACCINI, R.; AGUIAR, N. O.; NOVOTNY, E. H.; OLIVARES, F. L.; CANELLAS, L. P. Molecular characteristics of humic acids isolated from vermicomposts and their relationship to bioactivity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 47, p. 11412–9, 2014.
- MATLOU, M. C.; HAYNES, R. J. Soluble organic matter and microbial biomass C and N in soils under pasture and arable management and the leaching of organic C, N and nitrate in a lysimeter study. **Applied Soil Ecology**, v. 34, n. 2, p. 160–167, 2006.
- Mc PHIE, P. Enzyme purification and related techniques: dialysis. In: JACOBY, W. B. (Ed.). **Methods in enzymology**. New York: Academic Press, 1971. p. 25–175.
- MELO, L. C. A.; SILVA, C. A.; DIAS, B. DE O. Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 101–110, 2008.
- MÖLLER, A.; KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Dissolved organic carbon and nitrogen in precipitation, throughfall, soil solution, and stream water of the tropical highlands in northern Thailand. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, n. 5, p. 649–659, 2005.
- MORRA, M. J.; CORAPCIOGLU, M. O.; VON WANDUSZKA, R.; MARSHALL, D. B.; TOPPER, K. Fluorescence quenching studies of Naphtalene and 1-Naphthol interaction with humic acid. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 5, p. 1283–1289, 1990.
- MUNN, K. .; EVANS, J.; CHALK, P. Mineralization of soil and legume nitrogen in soils treated with metal-contaminated sewage sludge. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2031–2043, 2000.
- MURPHY, D. V.; MACDONALD, A. J.; STOCKDALE, E. A.; GOULDING, K. W. T.; FORTUNE, S.; GAUNT, J. L.; POULTON, P. R.; WAKEFIELD, J. A.; WEBSTER, C. P.; WILMER, W. S. Soluble organic nitrogen in agricultural soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, n. 5–6, p. 374–387, 2000.
- NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; MUSCOLO, A.; VIANELLO, A. Physiological effects of humic substances on higher plants. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, n. 11, p. 1527–1536, 2002.
- NUNES, R. R.; BENETTI, F.; PIGATIN, L. B. F.; MARTELLI, L. F. A.; REZENDE, M. O. O. Experimentos em química do solo : uma abordagem interdisciplinar no ensino superior. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 2, p. 478–493, 2014.
- OSBORNE, D. J.; MCMANUS, M. T. **Hormones: signals and target cells in plant development**. Cambridge: Cambridge University, 2005. 268 p.
- PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 810–832, 2001.
- PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. **Advances in Agronomy**, v. 75, p. 57–134, 2002.
- PICCOLO, A.; NARDI, S.; CONCHERI, G. Structural characteristics of humic substances as related to nitrate uptake and growth regulation in plant systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 24, n. 4, p. 373–380, 1992.
- PIGATIN, L. F. B.; NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. DE O. Substâncias húmicas. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Cubo, 2015. p. 294–309.
-

- PIZZEGHELLO, D.; ZANELLA, A.; CARLETTI, P.; NARDI, S. Chemical and biological characterization of dissolved organic matter from silver fir and beech forest soils. **Chemosphere**, v. 65, n. 2, p. 190–200, 2006.
- PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, T. O. D. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v. 7, n. 5, p. 1–13, 2011.
- REBELAKOU, E. P.; TSIAMIS, C.; MARKETOS, S. G. On the centenary of the term “hormone”. **Hormones**, v. 4, n. 3, p. 177–179, 2005.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007. 856 p.
- ROCHA, J. C.; ROSA, A. H. **Substâncias húmicas aquáticas: interação com espécies metálicas**. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 120 p.
- RODRIGUES, S. C.; BIANCHINI, A. Dissolved organic matter for use in aquatic toxicology studies. **Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology**, v. 2, n. 3, p. 275–281, 2007.
- ROSA, C. M. DA; CASTILHOS, R. M. V.; VAHL, L. C.; CASTILHOS, D. D.; PINTO, L. F. S.; OLIVEIRA, E. S.; LEAL, O. DOS A. Efeito de substâncias húmicas na cinética de absorção de potássio, crescimento de plantas e concentração de nutrientes em *Phaseolus vulgaris* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 959–967, 2009.
- ROZOV, S. M.; ZAGORSKAYA, A. A.; DEINEKO, E. V.; SHUMNY, V. K. Auxins: Biosynthesis, metabolism, and transport. **Biology Bulletin Reviews**, v. 3, n. 4, p. 286–295, 2013.
- SAKAKIBARA, H. Cytokinins: activity, biosynthesis, and translocation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, n. 1, p. 431–449, 2006.
- SALATI, S.; PAPA, G.; ADANI, F. Perspective on the use of humic acids from biomass as natural surfactants for industrial applications. **Biotechnology advances**, v. 29, n. 6, p. 913–22, 2011.
- SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica**. Porto Alegre: Genesis, 1999. 27 p.
- SCAGLIA, B.; NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O.; TAMBONE, F.; ADANI, F. Investigating organic molecules responsible of auxin-like activity of humic acid fraction extracted from vermicompost. **Science of The Total Environment**, v. 562, p. 289–295, 2016.
- SCAGLIA, B.; POGNANI, M.; ADANI, F. Evaluation of hormone-like activity of the dissolved organic matter fraction (DOM) of compost and digestate. **Science of The Total Environment**, v. 514, p. 314–321, 2015.
- SCHULTEN, H. R.; SCHNITZER, M. A state of the art structural concept for humic substances. **Naturwissenschaften**, v. 80, n. 1, p. 29–30, 1993.
- SCHULTEN, H. R.; SCHNITZER, M. Chemical model structures for soil organic matter and soils. **Soil Science**, v. 162, n. 2, p. 115–130, 1997.
- SINGH, H. P.; KAUR, S.; BATISH, D. R.; KOHLI, R. K. Ferulic acid impairs rhizogenesis and root growth, and alters associated biochemical changes in mung bean (*Vigna radiata*) hypocotyls. **Plant Environment Interactions**, v. 9, n. 1, p. 267–274, 2014.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. Oxford: Oxford University, 1989. 329 p.
-

- STEVENSON, J. F. **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley, 1994. 512 p.
- STOCKDILL, S. M. J.; COSSENS, G. G. The role of earthworms in pasture production and moisture conservation. In: **Proceedings of the New Zealand Grasslands Association**. Auckland: New Zealand Grasslands Association, 1966. p. 168–183.
- SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**: chemical methods. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 1018–1020.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.
- TAMBONE, F.; ADANI, F.; GIGLIOTTI, G.; VOLPE, D.; FABBRI, C.; PROVENZANO, M. R. Organic matter characterization during the anaerobic digestion of different biomasses by means of CPMAS ¹³C NMR spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, v. 48, p. 111–120, 2013.
- TAN, K. H. **Environmental Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 1994. 304 p.
- TAN, K. H. **Principles of soil chemistry**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1998. 560 p.
- TOMATI, U.; GRAPPELLI, A.; GALLI, E. Lombrichi, fertilità del suolo e sviluppo delle piante. In: ASSEMBLEA NAZIONALE SULL'ALLEVAMENTO DEL LOMBRICO, 1., 1985, Verona. **Anais...** Verona: La Tipografica Varese, 1985. p. 45-57.
- TREVISAN, S.; FRANCIOSO, O.; QUAGGIOTTI, S.; NARDI, S. Humic substances biological activity at the plant-soil interface: from environmental aspects to molecular factors. **Plant signaling & behavior**, v. 5, n. 6, p. 635–43, 2010.
- TSAVKELOVA, E. A.; KLIMOVA, S. Y.; CHERDYNTSEVA, T. A.; NETRUSOV, A. I. Hormones and hormone-like substances of microorganisms: a review. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 42, n. 3, p. 229–235, 2006.
- USSIRI, D. A. N.; JOHNSON, C. E. Sorption of organic carbon fractions by spodosol mineral horizons. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 1, p. 253, 2004.
- VAN RHEE, J. A. Earthworm activity and plant growth in artificial culture. **Plant and Soil**, v. 22, n. 1, p. 45–48, 1965.
- WANG, X.; SUN, C.; GAO, S.; WANG, L.; SHUOKUI, H. Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus*. **Chemosphere**, v. 44, n. 8, p. 1711–1721, 2001.
- WETZEL, R. G. **Limnology**. Filadélfia: W.B. Saunders, 1975. 743 p.
- WITTE, W. G.; WHITLOCK, C. H.; HARRISS, R. C.; USRY, J. W.; POOLE, L. R.; HOUGHTON, W. M.; MORRIS, W. D.; GURGANUS, E. A. Influence of dissolved organic materials on turbid water: optical properties and remote-sensing reflectance. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. 20, p. 441–446, 1982.
- YU, K.; SOARES, J. M.; MANDAL, M. K.; WANG, C.; CHANDA, B.; GIFFORD, A. N.; FOWLER, J. S.; NAVARRE, D.; KACHROO, A.; KACHROO, P. **A feedback regulatory loop between G3P and lipid transfer proteins DIR1 and AZI1 mediates azelaic-acid-induced systemic immunity**. [S.l.], 2015. Disponível em: <[http://www.cell.com/cell-reports/pdf/S2211-1247\(13\)00152-6.pdf](http://www.cell.com/cell-reports/pdf/S2211-1247(13)00152-6.pdf)>. Acesso em: 13 jul. 2015.
- ZEPP, R. G. Interactions of marine biogeochemical cycles and the photodegradation of dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen. In: GIANGUZZA, A. (Ed.). **Marine chemistry**. Amsterdam: Kluwer Academic, 1997. p. 329–351.
-

CAPÍTULO III

PRODUÇÃO ORGÂNICA DE PIMENTÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO

EFEITOS FISIOLÓGICOS DA APLICAÇÃO DE VERMICOMPOSTOS NO CULTIVO ORGÂNICO DE PIMENTÃO

Que seu alimento seja o seu remédio
Hipócrates

RESUMO DO CAPÍTULO III

NUNES, Ramom Rachide. Capítulo III — Produção orgânica de pimentão em ambiente protegido: Estudo dos efeitos da aplicação de vermicompostos obtidos a partir de resíduos de curtume na fisiologia das plantas de pimentão. In: Estudo químico e espectroscópico da dinâmica da vermicompostagem de resíduos de curtume. Tese (Doutorado em Química). Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. 2016. p.165-264.

Neste capítulo, os vermicompostos foram aplicados no cultivo orgânico do pimentão *Capsicum annuum* em ambiente protegido (casa de vegetação). Durante anos, a ANVISA e órgãos de defesa do consumidor vêm alertando a sociedade civil, órgãos e governos sobre o uso exacerbado de pesticidas, principalmente no cultivo de pimentão, no qual o estado de São Paulo se destaca entre os maiores produtores, em pequenas unidades de agricultura familiar. Com vistas à melhoria da qualidade dos alimentos presentes na mesa do brasileiro e sua segurança alimentar, este capítulo teve como objetivo principal avaliar os efeitos da aplicação de vermicompostos — preparados a partir de resíduos de curtume — no cultivo orgânico do pimentão em ambiente protegido. Ao incorporar MO ao solo, espera-se que seus atributos de fertilidade melhorem, favorecendo a nutrição vegetal além do crescimento de plantas mais fortes e saudáveis, que demandem menos pesticidas e outros defensivos químicos. Para isso, estudaram-se as amostras GBP—LAd (experimento controle, um latossolo amarelo distrófico), GBP—NPK (experimento referência, solo + fertilizante mineral) e GBP—VRC (solo + vermicomposto nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%). As amostras GBP—VRC foram subdivididas de acordo com o tipo de vermicomposto utilizado: GBP—STD, GBP—L, GBP—A, GBP—AL. O solo, o NPK e os vermicompostos foram caracterizados quanto aos seus teores de macro e micronutrientes, os quais permitiram inferir acerca do potencial nutritivo dos substratos. Já o cultivo orgânico foi monitorado por meio do desenvolvimento das culturas (tamanho da planta, número de folhas, área foliar) e produção de frutos (tempos médios de floração, formação do fruto e de maturação, além do número total de frutos, bem formados e com anomalias). Também analisou-se o transporte e a dinâmica do Cr, do solo para os tecidos vegetais da raiz, caule e talos, folhas e frutos. Plantas que receberam quaisquer vermicompostos (GBP—VRC) se desenvolveram mais se comparadas às amostras GBP—LAd e GBP—NPK. Dados relacionados ao desenvolvimento das plantas indicaram que os vermicompostos foram eficazes no cultivo orgânico de pimentão em ambiente protegido, com produção de até 3 frutos por planta. Aquém deste resultado, a amostra GBP—NPK produziu apenas 1 fruto por planta e na amostra GBP—LAd, nenhum. Dentre as amostras do grupo GBP—VRC, a amostra VRC—L demonstrou ser menos bioestimulante que as demais; porém, a presença do vermicomposto contendo o lodo de curtume não apresentou malefício para as plantas, permitindo assim o seu processamento junto às aparas curtidas para a obtenção do vermicomposto VRC—AL, sob aplicação do qual foram observados os melhores resultados, tanto no desenvolvimento das plantas quanto na produção de frutos, com até 3 frutos colhidos por planta. Ao investigar a dinâmica do Cr nas plantas de pimentão, apenas o Cr (III) foi detectado e quantificado, conforme o esperado. Absorvido pela raiz, a maior quantidade de Cr foi determinada nos frutos, porém abaixo do valor recomendado pela USDA para o consumo humano diário ($25,0\text{--}35,0\text{ }\mu\text{g Cr dia}^{-1}$). Assim, consideram-se que os pimentões colhidos estão aptos para o consumo humano e não apresentam riscos para sua saúde humana e segurança alimentar. Assim, conclui-se a tese de que os vermicompostos — produzidos a partir de resíduos de curtume — podem ser aplicados no cultivo orgânico de pimentão em ambiente protegido, com bons resultados de produtividade e, principalmente, um potencial valor de mercado em virtude da qualidade e aparência dos frutos obtidos.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	177
1.1.	O uso do solo em um contexto histórico	177
1.2.	A agricultura de base orgânica.....	178
1.3.	Uso de vermicompostos na agricultura	181
1.4.	Nutrição vegetal	182
1.4.1.	Nutrientes — Elementos essenciais.....	183
1.4.2.	Macronutrientes.....	183
1.4.3.	Micronutrientes	185
1.5.	Pimentão	187
1.5.1.	A cultura do pimentão	187
1.5.2.	Desafios do cultivo convencional do pimentão	188
2.	OBJETIVOS DO CAPÍTULO III.....	190
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	191
3.1.	Solo	191
3.2.	Semeaduras comerciais.....	191
3.3.	Cultivo dos pimentões em sistema protegido.....	191
3.3.1.	Montagem dos experimentos	191
3.3.2.	Planejamento experimental.....	192
3.3.3.	Rega e cuidados com as plantas	194
3.4.	Monitoramento do cultivo de pimentão verde	194
3.4.1.	Crescimento	194
3.4.2.	Folhas.....	194
3.4.3.	Frutos	195
3.5.	Monitoramento da dinâmica do Cr	195
4.	RESULTADOS	197
4.1.	Caracterização do solo.....	197
4.2.	Avaliação do potencial nutritivo dos vermicompostos e fertilizante mineral NPK	198
4.3.	Monitoramento do cultivo de pimentão verde	199
4.3.1.	Crescimento	206
4.3.2.	Folhas.....	211
4.3.3.	Análise foliar — Macro e micronutrientes.....	222
4.3.4.	Frutos	229
4.4.	Dinâmica e transporte do Cr	247
5.	DISCUSSÃO	249
5.1.	Caracterização do solo e avaliação do potencial nutritivo dos substratos	249
5.2.	Monitoramento do cultivo de pimentão verde	250
5.3.	Dinâmica e transporte do cromo	253

6.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO III	256
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	257

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — III.	Coleta e preparo do solo utilizado no cultivo de pimentão; a. Coleta do solo a 40 cm de profundidade utilizando um trator; b. Medição da profundidade; c. Transporte do solo para casa de vegetação, utilizando um trator; d. Preparo do solo.	192
Figura 2 — III.	Casa de vegetação na qual foram conduzidos os experimentos de cultivo de pimentão em sistema protegido; a. Construção da casa de vegetação, em março de 2014; b. Vista do interior da casa de vegetação; c. Observação e tomada de notas acerca do crescimento dos frutos; d. Vista do cultivo de pimentão, 75 dias após o plantio.	193
Figura 3 — III.	Estágios de formação do pimentão: florescência, queda das pétalas e desenvolvimento do fruto.....	195
Figura 4 — III.	Manuseio e cultivo das mudas de pimentão; a. Mudas de pimentão com 5 cm de altura na bandeja comercial; b. Mudas de pimentão com 5,0 cm de altura em potes plásticos; c. Mudas de pimentão com 10,0 cm de altura, prontas para o início dos experimentos; d. Preparo para início dos experimentos; e. Início dos experimentos de cultivo de pimentão em sistema protegido.	200
Figura 5 — III.	Crescimento das culturas de pimentão em latossolo amarelo distrófico (amostra controle GBP—LAd) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.....	201
Figura 6 — III.	Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação de fertilizante mineral NPK (amostra referência, GBP—NPK) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.	202
Figura 7 — III.	Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.	203
Figura 8 — III.	Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.	204
Figura 9 — III.	Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.	205
Figura 10 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).	207
Figura 11 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	208
Figura 12 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—A) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).	209

Figura 13 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).	210
Figura 14 — III.	Comparação entre as dimensões das folhas de pimentão verde cultivados em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd), com adição de fertilizante NPK (amostra GBP—NPK) e com adição do vermicomposto AL na concentração de 6% (amostra GBP—6,0%—AL) após 45 dias de plantio.....	211
Figura 15 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).	213
Figura 16 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	214
Figura 17 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	215
Figura 18 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).	216
Figura 19 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	218
Figura 20 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	219
Figura 21 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	220
Figura 22 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).....	221
Figura 23 — III.	Variação dos teores foliares de N determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	223

Figura 24 — III.	Variação dos teores foliares de P determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	223
Figura 25 — III.	Variação dos teores foliares de K determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	224
Figura 26 — III.	Variação dos teores foliares de Ca determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	224
Figura 27 — III.	Variação dos teores foliares de Mg determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	225
Figura 28 — III.	Variação dos teores foliares de S determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	225
Figura 29 — III.	Variação dos teores foliares de B determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	227
Figura 30 — III.	Variação dos teores foliares de Cu determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	227
Figura 31 — III.	Variação dos teores foliares de Mn determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	228
Figura 32 — III.	Variação dos teores foliares de Zn determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	228
Figura 33 — III.	Variação dos teores foliares de Fe determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.	229
Figura 34 — III.	Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas em LAd com aplicação do fertilizante mineral NPK (amostra GBP—NPK).	230
Figura 35 — III.	Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas em LAd com aplicação do vermicomposto STD em diferentes concentrações (GBP—1,5%—STD, GBP—3,0%—STD e GBP—6,0%—STD).	230
Figura 36 — III.	Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas em LAd com aplicação do vermicomposto L em diferentes concentrações (GBP—1,5%—L, GBP—3,0%—L e GBP—6,0%—L).	231
Figura 37 — III.	Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas LAd com aplicação do vermicomposto A em diferentes concentrações (GBP—1,5%—AL, GBP—3,0%—A e GBP—6,0%—A).	231
Figura 38 — III.	Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas LAd com aplicação do vermicomposto AL em diferentes concentrações (GBP—1,5%—AL, GBP—3,0%—AL e GBP—6,0%—AL).	232

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — III.	Características químicas e granulométrica do solo utilizado no cultivo de pimentão.	197
Tabela 2 — III.	Macro e micronutrientes determinados no solo utilizado no cultivo de pimentão.	197
Tabela 3 — III.	Macro e micronutrientes determinados nos vermicompostos utilizados no cultivo de pimentão (amostras GBR—VRC) e, também, análise do fertilizante mineral NPK (amostra GBP—NPK).	198
Tabela 4 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral do tipo NPK (amostra GBP—NPK). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).	206
Tabela 5 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).	207
Tabela 6 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).	208
Tabela 7 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—A). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).	209
Tabela 8 — III.	Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).	210
Tabela 9 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral do tipo NPK (amostra GBP—NPK). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena de cultivo.	212
Tabela 10 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena de cultivo.	213
Tabela 11 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena de cultivo.	214

Tabela 12 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena de cultivo.	215
Tabela 13 — III.	Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena de cultivo.	216
Tabela 14 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral do tipo NPK (amostra GBP—NPK). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo.	217
Tabela 15 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo.	218
Tabela 16 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo.	219
Tabela 17 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo.	220
Tabela 18 — III.	Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo.	221
Tabela 19 — III.	Análise foliar (macro e micronutrientes) das plantas de pimentão cultivados em diferentes substratos, LAd, NPK e VRC. Parte I — Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S.	222
Tabela 20 — III.	Análise foliar (macro e micronutrientes) das plantas de pimentão cultivados em diferentes substratos, LAd, NPK e VRC. Parte II — Micronutrientes: B, Cu, Mn, Zn e Fe.	226
Tabela 21 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com fertilizante mineral NPK em LAd (amostra GBP—NPK): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).	233
Tabela 22 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto STD com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—STD): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).	234

Tabela 23 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto STD com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—STD): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	235
Tabela 24 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto STD com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—STD): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	236
Tabela 25 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto L com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—L): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	237
Tabela 26 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto L com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—L): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	238
Tabela 27 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto L com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—L): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	239
Tabela 28 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto A com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—A): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	240
Tabela 29 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto A com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—A): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	241
Tabela 30 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto A com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—A): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	242
Tabela 31 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto AL com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—AL): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	243
Tabela 32 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto AL com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—AL): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	244
Tabela 33 — III.	Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto AL com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—AL): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).....	245
Tabela 34 — III.	RESUMO — Dados de produção de pimentão vermelho em diferentes substratos.	246
Tabela 35 — III.	Determinação dos teores de Cr (III) nos diferentes substratos utilizados para o cultivo de pimentão, antes das plantas serem transplantadas e após a colheita dos frutos, assim como a diferença destes teores em função do tempo, ΔCr (III) (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).....	247
Tabela 36 — III.	Determinação dos teores de Cr (III) nas plantas de pimentão, em diferentes partes: raiz, caule e talos, folhas e frutos (média $\pm$ DP, n = 3, cálculos com base em peso seco).....	248

1. INTRODUÇÃO

1.1. O uso do solo em um contexto histórico

A história da humanidade está repleta de exemplos de grandes civilizações que nasceram e se desenvolveram em localidades nas quais seus solos permitiam a obtenção de colheitas fartas (Chiba e Camargo, 2015).

Com o advento da agricultura, o ser humano — antes nômade — sentiu a necessidade de compreender e aprimorar os processos e mecanismos envolvidos no desenvolvimento e crescimento das plantas. Assim, o domínio das práticas e técnicas agrícolas transformou — para sempre — a feição do planeta Terra (Lopes e Guilherme, 2007; Patzel et al., 2000; Tisdale et al., 1990). Logo, a humanidade passa a depender dos solos e, mais ainda, que estes solos sejam férteis (Chiba e Camargo, 2015; Rezende, 2015; Landgraf et al., 2005).

Com o tempo, o ser humano pode se estabelecer, fixar moradia e cultivar a terra. Consequentemente ocorreu uma explosão demográfica — fundação de povoados e cidades — que, por sua vez, resultou em uma maior demanda por alimentos. Como consequência, o ser humano foi forçado a expandir suas áreas agricultáveis. Desde então a humanidade necessita estudar o solo e seu manejo, a fim de melhorar sua fertilidade e a produção de alimentos (Rezende, 2015; Landgraf et al., 2005).

Com terras cada vez mais vastas, deu-se início à agricultura de extensão e seus latifúndios: nutriam-se as populações e dava ao povo uma sensação de bem-estar social. Contudo, ao longo dos anos, percebeu-se que o meio ambiente e seus compartimentos ambientais (em especial o solo) sofriam com o uso e exploração exacerbada dos recursos naturais (Chiba e Camargo, 2015; Bianchini e Medaets, 2013).

Desde então, sabe-se que a produção de alimentos — vegetal e animal — é uma atividade intrínseca ao meio ambiente, podendo afeta-lo de forma negativa, positiva ou cruzada, que é quando um impacto positivo sobre o solo pode ser negativo sobre um manancial, por exemplo. Dentre os principais danos ao solo, destacam-se (Melo et al., 2015; Foley et al., 2005; Patzel et al., 2000):

- i. A degradação da MO;
- ii. Os processos erosivos;
- iii. A redução da capacidade de retenção de água;
- iv. A contaminação por elementos-traço e substâncias orgânicas persistentes;
- v. Salinização, entre outros.

Recentemente, até meados dos anos 90, os solos brasileiros sofreram uma perda progressiva e acentuada de sua capacidade de produção, consequência da forma com a qual se entendia e tratava o sistema agrícola de produção. Até então, acreditava-se que o solo seria capaz de uma recuperação inabalável e, além disso, o sistema agropecuário era tratado como uma mera interação entre o solo e a planta. Atualmente, sabe-se que a degradação de grande parte dos solos brasileiros ocorreu pelo desconhecimento e pela adoção de práticas agrícolas, persistentes até hoje, que desfavoreceram os ciclos biogeoquímicos, os quais são responsáveis por vários processos de síntese e degradação de compostos essenciais para os solos e o meio ambiente (Melo et al., 2015; Patzel et al., 2000).

Uma característica marcante da agricultura brasileira é a forma em que se dá sua estrutura e organização social, geralmente mediante crédito subsidiado e a assistência técnica gratuita de empresas multinacionais, bancos, universidades (grupos de extensão) e grupos governamentais. Além de zelar pelo agricultor e o meio ambiente, é este modelo que vem garantindo a produção brasileira em seus diferentes níveis, da agricultura familiar ao agronegócio. Embora haja controvérsias — a agricultura é uma atividade social, ambiental e econômica altamente problematizada e questionada em todos os níveis políticos, como deve ser — essas organizações zelam pela saúde do meio ambiente, do agricultor e da sociedade em geral,

evitando vários problemas relacionados ao mau uso das técnicas agrícolas, os quais são frequentemente criticados pela literatura científica, tais como (Andréa, 2015; Almeida et al., 2001; Almeida, J.; Navarro, 1997):

- i. Uso desnecessário de agrotóxicos;
- ii. Uso de sementes transgênicas (geneticamente modificadas);
- iii. Movimentação excessiva no preparo do solo;
- iv. Aplicação inadequada de fertilizantes minerais, entre outros.

Contudo, apesar dos diversos esforços a fim de corrigir e melhorar as práticas agrícolas convencionais, são cada vez mais evidentes os problemas ocasionados por este modelo, o que vem motivando diversos setores do meio agrícola (cientistas, agricultores, gestores etc.) a rever seus conceitos e a repensar o modelo de produção agrícola. Questões ambientais e sociais passaram a pesar mais na balança da sustentabilidade, de um modo geral, reduzindo a importância dada à questão econômica (Andréa, 2015; Almeida et al., 2001; Almeida, J.; Navarro, 1997).

1.2. A agricultura de base orgânica

Com o agravamento dos efeitos colaterais da agricultura convencional, com destaque para os fatores relacionados à desigualdade social e à degradação ambiental (Beltrão, 2003), fez-se mandatória e urgente a quebra do paradigma da alta produtividade a qualquer custo e do pensamento simplista (Leff, 2008). Assim, a agricultura de base ecológica — que já se apresentava como um contraponto desde o final do século XIX na Europa e mais recentemente no Brasil — vem ganhando destaque no cenário agrícola mundial (Andréa, 2015).

Em função das correntes de pensamento e dos movimentos que surgiam simultaneamente em diferentes países, a agricultura de base ecológica pode ser encontrada em diferentes termos aplicadas a este tipo de prática agrícola, por exemplo (Bianchini e Medaets, 2013; Darolt, 2002, 2011):

- i. Agricultura biodinâmica Alemanha e Áustria, em 1920
- ii. Agricultura organo-biológica Suíça e Áustria, em 1930
- iii. Agricultura natural Japão, em 1935
- iv. Agricultura ecológica Alemanha e Holanda, em 1980
- v. Agricultura regenerativa Estados Unidos, em 1980
- vi. Agricultura biológica França, em 1960
- vii. Permacultura Austrália, em 1970
- viii. Agricultura orgânica Reino Unido e Estados Unidos, em 1930
- ix. Agroecologia América Latina e Estados Unidos, em 1980

A partir dos anos 80, os pensamentos que cerceavam a agricultura de base ecológica se espalhou para os demais países e o resto do mundo, tendo como denominador comum a filosofia de uma agricultura natural, integrada com o meio ambiente (Alves et al., 2012; Billaud, 1995).

Apesar dos avanços que envolvem essas práticas agrícolas, os sistemas de base ecológica ainda eram carentes de padrões e regulamentações — normas específicas que determinavam a natureza de cada produto — e que, com o passar dos anos foi se normatizando, dando origem à agricultura orgânica, conforme praticada atualmente (Andréa, 2015; Fonseca et al., 2009; Darolt, 2002).

A normatização para a produção de produtos orgânicos se iniciou na Europa, na década de 1970, com a criação da Federação Internacional do Movimento da Agricultura Orgânica (IFOAM), uma organização não governamental que congrega mais de 770 organizações certificadoras, processadoras, distribuidoras e de pesquisa, de 112 países. As primeiras normas internacionais foram compostas em 1981, a partir de diversos pensamentos, normas e perspectivas. Internacionalmente aceitos, os padrões estabelecidos pela IFOAM norteiam as ações de grande parte das entidades certificadoras. O comércio internacional de produtos orgânicos, animal e vegetal, começou a ser orientado pelo documento 2092/91 de 24 de junho de 1991, a partir de ações do concílio regulador da Comunidade Econômica Europeia (CEE) (Andréa, 2015; Alves et al., 2012).

No Brasil, a partir de 1994, iniciou-se a regulação de produtos orgânicos por meio de portarias do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Em 1995 foi criada a Comissão Nacional da Produção Orgânica, integrando os atores da rede de produção orgânica e promovendo a participação efetiva da sociedade no planejamento e gestão de políticas públicas (Alves et al., 2012; Brasil, 2004, 2008a; Saminéz et al., 2008).

A primeira norma brasileira para a produção orgânica foi a Instrução Normativa nº 007 de 17 de maio 1999 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), definindo o conceito de sistema orgânico de produção agropecuária e industrial, no qual são adotadas tecnologias para (Fonseca et al., 2009; Fonseca, 2005; Brasil, 1999):

- i. Otimizar o uso de recursos naturais e socioeconômicos, considerando a integridade cultural e autossustentação no tempo e no espaço;
- ii. Maximizar os benefícios sociais;
- iii. Minimizar a dependência de energias não-renováveis, e
- iv. Eliminar a utilização de agrotóxicos e/ou demais insumos tóxicos, organismos geneticamente modificados (transgênicos), ou radiações ionizantes em qualquer etapa do processo produtivo, armazenagem ou consumo, preconizando a preservação da saúde ambiental e humana, assegurando a transparência em todas as fases da produção e transformação.

A restauração da fertilidade do solo por meio de processos biológicos é uma das principais características da agricultura orgânica (Barros e Silva, 2010; Primavesi, 2002).

Em 2002, uma nova legislação brasileira de orgânicos foi estabelecida a partir de alterações na Instrução Normativa nº 007 de 17 de maio 1999, de modo a tornar o processo de normalização mais participativo, não excludente, referente aos processos de certificação participativa em rede (Alves et al., 2012).

Em 23 de dezembro de 2003 foi aprovada a Lei nº 10.831 que conceitua a produção orgânica no Brasil, objetivando principalmente (Brasil, 2003):

- i. Oferecer produtos saudáveis isentos de contaminantes intencionais;
- ii. Preservar a biodiversidade dos ecossistemas naturais e a recomposição da biodiversidade de ecossistemas modificados.

A Instrução Normativa nº 007 foi revogada em 2008, sendo substituída pela Instrução Normativa nº 064 de 18 de dezembro de 2008. Nesse documento, fica definido que um produto da agricultura orgânica ou produto orgânico, processado ou in natura, é definido como aquele proveniente de sistema orgânico de produção agropecuário ou obtido de processo extrativista sustentável e não danoso ao ecossistema local, cuja comercialização só poderá ocorrer mediante sua certificação por entidade reconhecida oficialmente, exceto quando comercializados diretamente aos consumidores por agricultores familiares, cuja certificação é facultativa (Brasil, 2008b).

Em junho de 2008, na assembleia geral da IFOAM, a definição de agricultura orgânica foi retificada e, desde então, passou a ser descrita como (IFOAM, 2008):

“A agricultura orgânica é um sistema de produção que promove a saúde dos solos, ecossistemas e pessoas. Tem como base os processos ecológicos, biodiversidade e ciclos adaptados às condições locais em alternativa ao uso de insumos com efeitos adversos. A Agricultura orgânica combina a tradição, inovação e ciência de modo a ser benéfica para o espaço partilhado, promovendo relacionamentos justos e assegurando uma boa qualidade de vida a todos os envolvidos”.

No Brasil, a agricultura orgânica fornece predominantemente produtos de consumo direto, principalmente laticínios, conservas e hortigranjeiros, concentrando-se principalmente em São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Paraná e Rio Grande do Sul, normalmente comercializados em feiras livres e estabelecimentos de produtos naturais (Santos et al., 2012). Em 2007, o mercado brasileiro representava apenas 0,4% dos US\$ 26,5 bilhões registrados no comércio mundial de produtos orgânicos (Brasil, 2007). Contudo, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores de orgânicos do mundo, com um potencial crescimento anual, superior à média mundial, sob os aspetos de quantidade, diversidade e qualidade dos produtos, com destaque para a produção de açúcar mascavo, café, caju, cereais (milho, arroz e trigo), dendê, erva-mate, frutas (banana e citrus), hortaliças, leguminosas (feijão e amendoim), plantas medicinais e soja (Santos et al., 2012).

Em geral, na produção orgânica incentiva-se o aumento do volume de produtos diferenciados, o que ocorre principalmente em hortifrutigranjeiros. Trata-se de um nicho de consumo e, conseqüentemente, uma ótima oportunidade de negócio, que deve ser aproveitada pelos empreendedores (Lago et al., 2006).

Dentre as vantagens da prática da agricultura orgânica, destacam-se (Campanhola e Valarini, 2001):

- i. Viabilidade de produção em pequena escala, em pequena área cultivável;
- ii. Diversificação produtiva;
- iii. Geração de trabalho e renda;
- iv. Pouca dependência de insumos externos;
- v. Não utilização de agrotóxicos;
- vi. Maior biodiversidade nos solos;
- vii. Sobrepreço do produto orgânico em relação ao convencional;
- viii. Maior vida de prateleira dos produtos, entre outras.

Entretanto, os mesmos autores destacam alguns desafios, tais como:

- i. Produção em pequena escala;
- ii. Baixa capacitação gerencial;
- iii. Pesquisa científica específica;
- iv. Assistência técnica oficial adequada;
- v. Maior demanda de força de trabalho;
- vi. Acesso ao crédito;
- vii. Custos e exigências da certificação (selo);
- viii. Especificidade no processamento dos produtos, entre outros.

Na produção agrícola orgânica utilizam-se predominantemente recursos endógenos e tecnologias locais adaptadas, com baixos impactos ambientais e baixo custo energético (Gliessman, 2009; Altieri, 1987). Atualmente, cerca de 70% dos alimentos orgânicos produzidos no Brasil é proveniente da agricultura familiar (Castro Neto et al., 2010; Terrazzan e Valarini,

2009). Entretanto, considera-se baixa a adesão a este processo, uma vez que apenas 1,8% dos estabelecimentos rurais no Brasil utilizam os princípios agroecológicos na produção (Urchei et al., 2009).

Os produtos provenientes da agricultura orgânicas ou de base agroecológica são potencialmente mais competitivos, cujas características podem ser tão peculiares que seriam capazes de representar ou identificar o local de sua produção (origem controlada), associado ao conhecimento tradicional dos agricultores, conquistando cada vez mais consumidores (Bianchini e Medaets, 2013; Wesz Junior, 2011; Krischke e Tomiello, 2009).

A agroecologia e a produção orgânica têm sido cada vez mais abordadas na pesquisa agropecuária brasileira, principalmente a partir do Marco Referencial de Agroecologia, em 2006, editado pela EMBRAPA, no qual considera a agroecologia como ciência, além de estruturar as redes de pesquisa e nortear os portfólios de projetos (EMBRAPA, 2006a).

Um dos grandes desafios da agricultura de base orgânica é a substituição dos fertilizantes minerais por outros, orgânicos. Conforme citado anteriormente, os documentos normativos e que regulam a agroecologia e a produção orgânica vetam, sistematicamente, o uso de fertilizantes minerais a fim de promover os níveis desejados de nutrientes no solo. Uma alternativa para correção dos parâmetros de fertilidade de um solo agrícola é a incorporação de matéria orgânica (MO): fonte de nutrientes, microrganismos, além de compostos orgânicos que atuam como reguladores hormonais essenciais para as plantas, entre outros benefícios já introduzidos no Capítulo I e Capítulo II.

Entre as práticas de valorização da MO — aplicadas ao preparo de insumos agrícolas orgânicos — destaca-se a vermicompostagem, um processo biológico avançado que foi amplamente apresentado e discutido no Capítulo I. Agora, neste capítulo, foram avaliados os efeitos da aplicação dos vermicompostos — preparados e caracterizados — no cultivo de pimentão *Capsicum annuum* L.

1.3. Uso de vermicompostos na agricultura

O substrato — seus atributos químicos, físicos e biológicos — constitui uma parte fundamental para a nutrição vegetal. É dele que as plantas obtêm os sais e nutrientes essenciais para a manutenção de seus sistemas fisiológicos, por meio de seu sistema radicular (Taiz e Zeiger, 2013; Kerbauy, 2004).

Em geral, o substrato utilizado em cultivos orgânicos deve ser um solo fértil acrescido de um insumo agrícola, rico em MO. Além disso, espera-se que esse insumo seja proveniente de algum processo de valorização de seus constituintes químicos e, em via de regra, é obtido a partir de quaisquer materiais sem valor agregado: resíduos agrícolas, resíduos organo-domésticos, resíduos organo-industriais etc. As práticas de valorização da matéria orgânica (compostagem, vermicompostagem, processos digestivos etc.) são alternativas viáveis e interessantes, pois agregam valor ao resíduo (precursor do insumo agrícola) além de melhorar a qualidade e saúde do meio ambiente.

Em geral, a escolha de um insumo agrícola com vistas à agricultura orgânica deve ser baseada em dois critérios essenciais:

- i. O custo do preparo do insumo agrícola, relacionado ao processo de valorização da MO; e
- ii. A disponibilidade dos resíduos, fonte de MO, para produção desse insumo.

A partir disso, o agricultor pode preparar o seu próprio insumo e aplica-lo no preparo de seu substrato. O ideal seria a escolha de uma técnica de baixo custo e o uso de resíduos orgânicos que sejam produzidos em sua propriedade rural, ou o mais próximo daquela. Entretanto, há necessidade de se verificar, experimentalmente, para cada espécie vegetal, qual o melhor substrato a partir do qual poder-se-á obter plantas mais saudáveis, de melhor qualidade e que produzam mais, de acordo com os objetivos do produtor rural (Albuquerque et al., 2011; Araújo et al., 2009; Jones Junior, 2005; Epstein, 1997).

Dentre as práticas de valorização da MO, a vermicompostagem e a vermicultura possuem um papel fundamental na manutenção dos ecossistemas agrícolas e no desenvolvimento da agricultura sustentável, sendo a sua fertilização baseada

na utilização de fatores de produção orgânica que promovem a valorização dos resíduos e a ciclagem dos nutrientes no solo e na planta. Além disso, a vermicompostagem é uma tecnologia barata, que exige baixo investimento para implementação e custeio de sua manutenção (Lourenço, 2014; Epstein, 1997; Ricci, 1996).

Nesse sentido, o tratamento dos resíduos, a produção de minhocas (vermicultura) e a aplicação do vermicomposto constituem um conjunto de atividades que deverão ser realizadas de forma correta e rigorosa de modo a garantir, além dos benefícios ambientais acrescidos, autonomia para o produtor rural (Lourenço, 2014; Ricci, 1996).

Gopinath et al. (2009) investigaram as vantagens da agricultura orgânica em comparação à agricultura convencional, demonstrando diversos benefícios para o produtor rural ao cultivar e comercializar frutos do pimentão *Capsicum annuum* L. obtidos por meio de métodos orgânicos de produção. Naquele estudo, ambos os métodos foram investigados e seus resultados confrontados. Na agricultura convencional, fez-se uso de fertilizantes minerais a fim de corrigir a deficiência de nutrientes presentes no solo, ao passo que, no modelo orgânico de agricultura, foram adicionados compostos e vermicompostos produzidos a partir de esterco bovino. Os resultados obtidos evidenciaram os benefícios da adição de MO ao solo, favorecendo significativamente a produção de frutos de pimentão.

Em um outro estudo, também envolvendo a adição de vermicompostos, porém de esterco suíno, Bachman e Metzger (2008) adotaram os princípios da agricultura orgânica no cultivo de pimentão, tomate *Lycopersicon esculentum*, entre outras hortaliças, obtendo bons resultados no que se refere ao desenvolvimento das plantas e produção de frutos.

Venturini et al. (2003) observaram que a utilização de vermicomposto na cultura do feijão *Phaseolus vulgaris* favoreceu a associação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio, sendo assim uma alternativa à substituição total ou parcial à utilização de fertilizantes minerais. Além disso, a inoculação das sementes com *Rhizobium* promoveu respostas semelhantes à utilização de nitrogênio sob a cobertura do solo, enquanto que a aplicação de fertilizantes minerais afetou negativamente a nodulação.

Em um estudo publicado por Beckmann et al. (2003), o uso de insumos orgânicos à base de vermicomposto de esterco bovino proporcionou a produção de frutos de tomateiro em níveis de produtividade equivalentes aos obtidos com a utilização de fertilizantes minerais. Em termos químicos, o vermicomposto auxiliou na disponibilidade de N, Ca, L, Mg, P, entre outros nutrientes. Em relação aos fatores físicos, aumentou a aeração, a drenagem, a retenção de água e de nutrientes.

Em todos esses estudos é evidente que a adição de vermicomposto auxiliou o desenvolvimento do pimentão e de outras culturas, promovendo o crescimento de plantas mais fortes que dispensam o uso — ou diminuem a demanda — de pesticidas e outros defensivos químicos. Um dos principais fatores relacionados ao crescimento, desenvolvimento e a produção de frutos estão intrinsecamente relacionados à nutrição vegetal (Epstein e Bloom, 2006; Malavolta et al., 1997; Malavolta, 1980).

1.4. Nutrição vegetal

Cultivar o solo e produzir alimentos é fundamental para que nosso ciclo de vida na Terra se mantenha. Porém, o ritmo frenético em que vivemos — em sociedade — nos obriga a trabalhar demasiadamente e, como consequência, atribuímos essa responsabilidade a terceiros. Primeiro ao agricultor e depois às grandes corporações. Por sua vez, a produção de alimentos se alinhou à geração de lucros e, conseqüentemente, à produção demasiada de itens supérfluos, além das necessidades humanas. Aspectos sociais, financeiros e culturais influenciam nosso estilo de vida e isso se reflete na forma em que tratamos o meio ambiente. No caso do solo, cultivar vai além do ato de plantar. Cultivar envolve o conhecimento sob inúmeras variáveis que interferem e influenciam na produção de alimento, tais como o teor de nutrientes, os níveis de MO, a rega etc.

Um aspecto de grande importância é saber avaliar o estado nutricional de espécies vegetais, fundamental para o manejo adequado das culturas agrícolas. No caso da produção de hortaliças, a nutrição mineral está entre os principais

fatores que influenciam o crescimento, a produtividade e a qualidade dos produtos colhidos (Marcussi, 2005; Marcussi et al., 2004; Marschner, 1995). Em geral, cada nutriente desempenha uma ou mais funções específicas no metabolismo e fisiologia das plantas. Caso este nutriente não se encontre em quantidade satisfatória, uma desordem fisiológica pode ocorrer, prejudicando de alguma forma o organismo vegetal (Epstein e Bloom, 2006; Fontes, 2006; Malavolta, 1980, 2006; Reuter e Robinson, 1997).

Os sintomas de deficiência — ou excesso — de um nutriente são o fim de uma sequência de eventos que se inicia com uma lesão molecular, evolui para uma alteração celular e, quando um conjunto de células ou tecido é afetado, surge o sintoma visual (Fontes, 2006; Malavolta, 1980, 2006; Reuter e Robinson, 1997).

A diagnose visual é um método empregado na avaliação do estado nutricional dos vegetais. Analisando as folhas e os frutos de uma planta é possível diagnosticar os sintomas de deficiência (ou excesso) e compará-los aos padrões de cada nutriente, quando estes já foram descritos na literatura (Malavolta, 1980, 2006; Faquin, 2005)

Esses sintomas em folhas e frutos variam entre as espécies vegetais, podendo variar, também, entre cultivares de uma mesma espécie, e a priori estão relacionados aos teores de macro e micronutrientes (Fontes, 2006; Malavolta, 1980, 2006; Reuter e Robinson, 1997).

1.4.1. Nutrientes — Elementos essenciais

As plantas absorvem do solo, sem discriminação, os elementos essenciais, os benéficos e os tóxicos. Sabe-se que todos os elementos essenciais devem estar presentes nos tecidos dos vegetais, mas nem todos os elementos presentes são essenciais. Segundo Malavolta (1980), um elemento químico é considerado essencial quando satisfaz algum dos critérios de essencialidade:

- i.* Direto: O elemento participa de algum composto ou de alguma reação que, sem a qual, a planta não sobrevive;
- ii.* Indireto: Deve atender a um dos itens abaixo,
 - ii.i.* Em sua ausência, a planta não completa seu ciclo de vida;
 - ii.ii.* O elemento não pode ser substituído por nenhum outro; e
 - ii.iii.* O elemento deve ter um efeito direto na vida da planta e não exercer apenas o papel de neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis para a planta.

Além do C, O e H (orgânicos), treze elementos (minerais) são considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas, sendo estes divididos por aspectos puramente quantitativos em dois grupos:

- i.* Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S
- ii.* Micronutrientes: B, Cl, Cu, Fe, Co, Mn, Mo, Ni e Zn

A distinção entre macro e micro é puramente quantitativa. Os macronutrientes são os elementos requeridos em maior quantidade pelas plantas, sob condições naturais. Já os micronutrientes, em menor quantidade (Malavolta, 1980).

1.4.2. Macronutrientes

A demanda por nutrientes — macro e micro — varia entre cada planta e cultura. No caso do pimentão, objeto deste estudo, existem poucos estudos a despeito de seus teores de macro e micronutrientes na planta, o que dificulta a avaliação

específica da deficiência ou suficiência de quaisquer nutrientes (Marcussi, 2005; Marcussi et al., 2004). Porém, considera-se que uma planta adulta de pimentão, em pleno florescimento, deva ter seus teores foliares de macronutrientes adequados em (Malavolta et al., 1997)¹:

- N: 35 g kg⁻¹
- P: 2,5 g kg⁻¹
- K: 25,0 g kg⁻¹
- Ca: 25,0 g kg⁻¹
- Mg: 7,5 g kg⁻¹
- S: 4,0 g kg⁻¹
- P: n.d.

Já no período entre 60-140 dias após o transplante das mudas, o K deve ser o nutriente de maior teor nas folhas do pimentão, seguido pelo N, Ca, Mg, S e o P (Marcussi, 2005):

- K: 50,5 g kg⁻¹
- N: 37,7g kg⁻¹
- Ca: 24,0 g kg⁻¹
- Mg: 9,6 g kg⁻¹
- S: 4,8 g kg⁻¹
- P: 4,4 g kg⁻¹

Nas plantas, o N está presente em substâncias que controlam o desenvolvimento, crescimento e multiplicação das células vegetais — aminoácidos e ácidos nucleicos — e está fortemente associado à produtividade do pimentão (Taiz e Zeiger, 2013; Charlo et al., 2012; Araújo et al., 2009; Silva et al., 2001).

Incorporar N aumenta a dimensão e o peso dos frutos, além de aumentar o número de frutos por planta, melhorando a produtividade do pimentão. Doses elevadas de N são necessárias para que a planta possa suportar o peso de um grande número de frutos. Assim, a demanda de N é maior no período de frutificação, dependendo da duração e do número de frutos obtidos (Silva et al., 2001, 2013; Malavolta et al., 1997).

Na falta ou insuficiência de N, o crescimento da planta é retardado e as folhas mais velhas adquirem uma coloração verde-pálida, desbotada. Em casos mais severos ocorre uma redução no tamanho dos folíolos e o surgimento de uma coloração púrpura nas nervuras principais, contrastando com o verde-pálido das folhas (Araújo et al., 2009; Malavolta et al., 1997; Malavolta, 1980).

Dentre os principais motivos relacionados a deficiência de N destacam-se: insuficiência de fertilizante nitrogenado, baixo nível de MO no solo, elevado nível de MO não decomposta, compactação do solo, lixiviação intensa e seca prolongada (Araújo et al., 2009; Malavolta et al., 1997; Malavolta, 1980).

Quanto ao P, sua deficiência pode suprimir o surgimento de novas folhas e a diminuição de sua eficiência fotossintética. Por ser de grande mobilidade, a deficiência de P ocasiona senescência (envelhecimento celular) nas folhas mais velhas, fazendo com que as mais jovens se mantenham saudáveis, além de retardar o desenvolvimento das plantas (Taiz e Zeiger, 2013; Moura et al., 2001; Malavolta et al., 1997; Malavolta, 1980).

¹ Cálculo com base na massa seca das folhas de pimentão. UNIDADE: g kg⁻¹ (g de nutriente por quilo de folha).

No caso do K, esse nutriente atua principalmente na formação dos frutos, suas características físicas (forma) e na síntese dos constituintes químicos do pimentão. O manejo adequado do solo e a adição de sais de potássio podem aumentar o número e a qualidade dos frutos obtidos (Melo et al., 2009; Fontes, 2006; Marcussi, 2005; Silva et al., 2001).

Quanto aos teores de Ca, esse nutriente desempenha um papel fundamental na estrutura das membranas e paredes celulares dos vegetais, atuando no crescimento e no desenvolvimento dos frutos (Taiz e Zeiger, 2013; Aktas et al., 2005; Marti e Mills, 1991). No caso do pimentão, após o N e o K, o Ca é o nutriente mais assimilado e acumulado pelas plantas. Sua deficiência pode afetar o crescimento das plantas, deixando-as compactas e com um número menor de folhas. As folhas novas desenvolvem-se pouco, ficam enrugadas, e apresentam coloração amarelada (clorose) na base e entre as nervuras, podendo passar à necrose caso a deficiência persista (Taiz e Zeiger, 2013; Fontes, 2006; Malavolta et al., 1997; Marti e Mills, 1991; Malavolta, 1980).

Já o Mg desempenha um papel específico na ativação de enzimas envolvidas na respiração, fotossíntese e síntese do DNA e RNA das plantas, além de ser um dos constituintes das moléculas de clorofila (Taiz e Zeiger, 2013). No que se refere ao pimentão, a deficiência de Mg não prejudica tanto a planta como ocorre com os outros macronutrientes. Em geral, a baixa concentração de Mg interfere no crescimento das plantas e, caso a deficiência persista, podem surgir folhas jovens com um enrolamento do limbo em torno da nervura principal e, também, com a superfície adaxial (face de cima) voltada para dentro. Com o tempo, caso persista a deficiência, pode ocorrer uma necrose e lesões cortiçadas, próximo das nervuras das folhas jovens (Fontes, 2006; Riga e Anza, 2003; Malavolta et al., 1997).

Nos organismos vegetais, o S está presente em diversos grupos de substâncias, que são os componentes estruturais — tais como aminoácidos e proteínas, coenzimas, sulfolipídeos, polissacarídeos, alcaloides, entre outros — e metabólitos, que atuam no controle hormonal para o crescimento e diferenciação celular (Taiz e Zeiger, 2013; Malavolta et al., 1997; Vitti, 1989). A deficiência de S pode ocasionar uma redução na taxa de crescimento das plantas, embora seja menos acentuada se comparada ao retardo provocado pela insuficiência de N. Além disso, baixos teores de S provocam o amarelamento das folhas, modificações no limbo foliar que passa a apresentar um aspecto ondulado, entre outros sintomas (Epstein e Bloom, 2006; Malavolta et al., 1997; Vitti, 1989; Malavolta, 1980).

Por último, o P atua em vários processos vitais às plantas, agindo principalmente no metabolismo vegetal, síntese de ácidos nucleicos, respiração celular, ativação e desativação enzimática, entre outros (Taiz e Zeiger, 2013; Epstein e Bloom, 2006). Os sintomas de deficiência de P são difíceis de serem observados, exceto quando em condição de carência severa. Em geral, plantas deficientes de P apresentam folhas verde-escuras ou azul-esverdeadas, com pigmentos vermelhos, púrpuros e marrons, principalmente ao longo das nervuras (Epstein e Bloom, 2006; Malavolta, 2006; Aguilera-Gomez et al., 1999).

1.4.3. Micronutrientes

A concentração de micronutrientes no solo e sua transferência para as plantas são fatores essenciais para o funcionamento e regulação das funções vitais dos organismos vegetais. No caso do pimentão, considera-se que uma planta adulta, em plena produção de frutos, deva ter seus teores foliares de micronutrientes adequados em (Faquin, 2005; Malavolta, 1980):

- B: 11,0 g ha⁻¹
 - Cl: n.d.
 - Cu: 8,0 g ha⁻¹
 - Fe: 44,0 g ha⁻¹
 - Mn: 27,0 g ha⁻¹
-

- Mo: n.d.
- Zn: 12,0 g ha⁻¹

Nas plantas, o B é o único nutriente que não atende ao critério direto de essencialidade e, ao lado do Zn, é o micronutriente que mais frequentemente promove a deficiência nutricional nas plantas. Absorvido pelas raízes na forma de ácido bórico (H₃BO₃) — principal forma solúvel na solução do solo — sua função nas plantas ainda não foi demonstrada de maneira inequívoca, mas sabe-se que o borato facilita o transporte de açúcares através das membranas dos tecidos vegetais. Neste caso, o borato formaria complexos açúcar-borato que atravessariam mais facilmente as membranas celulares do que as moléculas de açúcares altamente polares. Além disso, se imobilizado, os sintomas da deficiência de B aparecem nos órgãos mais novos e nos meristemas apicais, tanto da parte aérea quanto das raízes, resultando em uma redução do tamanho e deformação das folhas mais novas, morte da gema terminal e menor crescimento das raízes (Faquin, 2005; Mello et al., 2002; Malavolta, 1980).

Já o Cl, existem mais relatos de sua toxicidade que de sua deficiência, que é resultado do manejo exacerbado do solo. Nutriente de maior demanda pelas plantas, o Cl é determinado em teores foliares de ~ 2000,0 a 20000,0 mg kg⁻¹, embora a concentração ótima esteja entre 340,0-1200,0 mg kg⁻¹. Sua principal função está relacionada à fotossíntese, na qual o Cl atua na quebra fotoquímica da água (fotossistema II). Ademais, pouco se sabe sobre a função do cloro em outros processos metabólicos. Sua deficiência pode causar o murchamento da planta, além de clorose, bronzeamento e deformação das folhas, as quais adquirem forma de taça. Já o excesso de Cl pode causar a queima das pontas e margens das folhas, além de bronzeamento e amarelecimento das folhas (Taiz e Zeiger, 2013; Epstein e Bloom, 2006; Faquin, 2005; Malavolta, 1980).

O Cu atua no metabolismo vegetal e é o ativador ou o componente de enzimas que participam de diversas reações de oxirredução nas células vegetais. Sua deficiência causa, nas folhas novas, uma coloração verde escura e um aspecto flácido, com dimensões desproporcionalmente grandes. Já o excesso de Cu interfere no desenvolvimento e funcionamento das raízes, além do aparecimento de manchas amareladas ao longo da nervura principal (Epstein e Bloom, 2006; Faquin, 2005; NeSmith et al., 1992; Malavolta, 1980).

A concentração de Fe adequada nos tecidos vegetais varia entre 50,0-250,0 mg kg⁻¹. Em geral, valores abaixo de 50,0 mg kg⁻¹ indicam problemas de deficiência do elemento, que é caracterizada pelo amarelamento das folhas jovens, devido à menor síntese de clorofila. Caso a deficiência persista, as folhas podem sofrer um branqueamento. Em adição, o Fe compõe diversas enzimas, a maioria das quais participam de reações de oxirredução no metabolismo vegetal (Epstein e Bloom, 2006; Malavolta, 2006; Faquin, 2005).

Quanto ao Mn, são mais frequentes os relatos de sua toxicidade que a deficiência desse micronutriente. Sua principal função é participar de diversas rotas bioquímicas. Na forma Mn⁺² atua entre o ATP e as enzimas transferidoras de grupos (fosfoquinases e fosfotransferases). Além disso, o Mn⁺² ativa as enzimas descarboxilases e desidrogenases no ciclo de Krebs. Por ser pouco móvel na planta, os sintomas de sua deficiência se manifestam nas folhas mais novas que, inicialmente, apresentam um amarelecimento internerval. Além disso, dada a interação do Mn com outros nutrientes, o seu excesso pode manifestar-se como deficiência induzida de cálcio, magnésio e, em especial, de ferro. Caso a deficiência persista, pontos de cor marrom podem ser observados ao longo das nervuras, indicando um acúmulo de óxido de manganês (Taiz e Zeiger, 2013; Aktas et al., 2005; Faquin, 2005; Malavolta, 1980).

Já o Mo é o micronutriente menos abundante no solo e, também, o de menor demanda pelas plantas. No solo, é encontrado em suas formas aniônicas (HMoO₄⁻ e MoO₄⁻²) e, à medida que aumenta o pH do solo, eleva-se a disponibilidade do Mo. Componente de duas enzimas essenciais ao metabolismo do N, a redutase do nitrato e a nitrogenase, a deficiência de Mo causa o acúmulo de NO₃⁻, que não se reduz a NH₄⁺, que é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Taiz e Zeiger, 2013; Malavolta, 2006; Faquin, 2005).

Por último, o Zn está envolvido no metabolismo nitrogenado das plantas. Sua deficiência reduz a síntese proteica e eleva o acúmulo de aminoácidos e amidas. Em geral, em solos de regiões tropicais, o Zn se encontra adsorvido em argilas e na MO. Estima-se que 30-60% do Zn retido no solo esteja preso ao Fe_2O_3 (goetita) e, ao passo que se eleva o pH do solo, reduz-se a disponibilidade do Zn. A concentração ótima de Zn varia de 20,0-120,0 mg kg^{-1} . Em geral, sua deficiência está associada a teores menores que 20,0 mg kg^{-1} e, sua toxidez, acima de 400,0 mg kg^{-1} . Além disso, o Zn é um componente da RNA polimerase que, pela polimerização de nucleotídeos, leva à síntese do RNA, além de atuar na manutenção da integridade estrutural dos ribossomos. Os sintomas mais típicos de sua deficiência são observados no encurtamento dos internódios e na produção de folhas novas, além da formação de plantas anãs (Taiz e Zeiger, 2013; Malavolta, 2006; Aktas et al., 2005; Faquin, 2005).

1.5. Pimentão

O pimentão *Capsicum annuum* L., originário do continente americano — norte da América do Sul e América Central — possui plantas com altura de até 1,5 m de altura e caule semilenhoso. Seu sistema radicular é pivotante e profundo, apresenta folhas de coloração verde-escura de formato oval-lanceolado e flores pequenas em tons de branco, as quais dão origem a frutos que podem ser de cor verde (antes de amadurecer)², vermelho e amarelo, que são os tipos mais comuns, além de variedades exóticas, como o branco, o roxo, o preto e o laranja. Sua planta suporta uma carga leve de frutos, exigindo tutoramento (escoramento utilizando estacas) quando se eleva a produção de pimentões (Filgueira, 2008; Pereira, 1990). O fruto do pimentão — do tipo baga, ocos e em formato cônicos, cilíndricos e cúbicos — possui bons níveis nutricionais e é de baixa caloria. Um fruto de 100,0 g possui aproximadamente 29,0 kcal, 1,3 g de proteínas e 0,0 g de gorduras (Silva et al., 2010; Filgueira, 2008; Pereira, 1990).

Em termos de classificação taxonômica, o pimentão é assim classificado:

- Reino: *Plantae*
- Divisão: *Magnoliophyta*
- Classe: *Magnoliopsida*
- Ordem: *Solanales*
- Família: *Solanaceae*
- Gênero: *Capsicum*
- Espécie: *C. annuum*

1.5.1. A cultura do pimentão

Largamente cultivado no Brasil, o pimentão é uma hortaliça de grande importância socioeconômica, caracterizado como planta arbustiva (solanácea perene) e cultivada como cultura anual, destacando-se como uma das principais oleráceas produzidas no Brasil (Faria et al., 2014; Rinaldi et al., 2008; Ribeiro et al., 2000). Cultivado praticamente em todos os estados da federação, anualmente colhem-se aproximadamente 290 mil toneladas de pimentão, em mais de 13 mil hectares de área plantada, com destaque para os principais estados produtores: São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo. Em geral, seu cultivo é feito por pequenos e médios horticultores, motivados pelo rápido crescimento dos frutos e curto período para início da produção, o que resulta em rápido retorno dos investimentos (IBGE, 2015; Souza et al., 2011; Pereira, 1990).

² A cor verde do pimentão não está associada à sua variedade, sendo apenas o fruto não maduro. Logo, o pimentão verde não é um tipo específico de pimentão, como ocorre com as variedades vermelho, amarelo, entre outras.

As condições ideais para o desenvolvimento do pimentão se dá em temperaturas variando entre 20-30°C. Temperaturas abaixo a 15°C são limitantes nas fases de germinação, emergência e crescimento das mudas e, acima de 35°C afetam a floração, causando a queda das flores (Pereira, 1990). Além disso, a umidade relativa do ar ideal para produção de pimentão deve estar entre 50-80%. Acima disso, o ambiente pode favorecer o aparecimento de doenças e, abaixo, ocorre um excesso de transpiração das plantas (Filgueira, 2008).

Em geral, a cultura do pimentão é sensível e exigente no que se refere às condições climáticas. Uma alternativa interessante é o cultivo dessa hortaliça em ambiente protegido: plantio em estufas, casas de vegetação, tuneis, ripados etc. Essa tecnologia oferece a possibilidade de ajustar o ambiente às plantas, com a atenuação das variações extremas dos elementos meteorológicos desfavoráveis, como o controle da precipitação, redução da radiação solar incidente e velocidade do vento, controle das temperaturas do ar e do solo, entre outros fatores (Pivetta et al., 2011; Santos et al., 2010; Pereira, 1990).

No Brasil, estima-se que a área plantada de pimentão em sistema protegido seja de aproximadamente mil hectares e, além disso, o pimentão já é uma das cinco culturas com maior área cultivada nesse sistema. Anualmente, a adoção do plantio de pimentão em sistema protegido vem aumentando, motivada principalmente pelo aumento da produtividade e qualidade dos frutos (Lorentz et al., 2002; Silva et al., 2002; Scivittaro et al., 1999).

Diversos estudos comprovaram as vantagens em se cultivar o pimentão em um sistema protegido. Os resultados mais significativos são no que se refere à produção e qualidade dos frutos. Além disso, as culturas se desenvolveram mais, apresentando plantas mais saudáveis e com indicadores de uma boa nutrição vegetal (Sá, 2014; Scivittaro et al., 1999).

Entretanto, para obtenção de bons resultados com a cultura do pimentão em ambiente protegido, é necessário o planejamento adequado do sistema de produção, utilizando de métodos agrícolas eficientes. Além do sistema de cultivo é importante planejar o tipo de substrato (solo e insumos). Diversos estudos publicados indicaram que é possível adicionar vermicompostos no cultivo de pimentão, aumentando sua produtividade e qualidade dos frutos (Ferreira et al., 2014; Almeida et al., 2012; Santos et al., 2010; Ribeiro et al., 2000).

Ribeiro et al. (2000) apresentaram o uso de vermicompostos como insumo alternativo para a produção orgânica do pimentão, alcançando resultados melhores que os observados no plantio convencional, tanto na produção quanto na qualidade dos frutos colhidos. Santos et al. (2010) aplicaram esterco bovino vermicompostado no cultivo de mudas de pimentão. Em um estudo semelhante, Ferreira et al. (2014) adicionaram ao esterco bovino diferentes quantidades de esterco de pequenos ruminantes, também no cultivo de pimentão e berinjela *Solanum melongena*. O mesmo experimento foi realizado por Almeida et al. (2012), porém utilizando resíduos de carne vermicompostados. Em todos esses estudos foram obtidos resultados satisfatórios e acima da expectativa dos autores. Este e outros estudos motivaram o uso de vermicompostos no cultivo orgânico de pimentão em ambiente protegido (Ferreira et al., 2014; Almeida et al., 2012; Santos et al., 2010; Ribeiro et al., 2000; Scivittaro et al., 1999).

1.5.2. Desafios do cultivo convencional do pimentão

Anualmente, diversos testes quantitativos para a determinação de resíduos de pesticidas são realizados em frutas, legumes, hortaliças etc. Por meio dessas análises é possível investigar a transferência de tais contaminantes orgânicos à nossa alimentação. Embora a aplicação de pesticidas seja amplamente defendida por diversos pesquisadores e empresas, a contaminação de seres humanos por tais moléculas é inaceitável, não devendo os governos serem omissos e coniventes com quaisquer contaminações (Baird, 2011; Neto e Sarcinelli, 2004; Paarlberg, 1992; Carson, 1962).

Em um estudo divulgado pela Associação Brasileira de Defesa do Consumidor (PROTESTE) e pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA)³, foram analisadas amostras de alface, maçã, milho, morango, pimentão, tomate, farinha de trigo e soja, todas adquiridas em supermercados e feiras das cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro, provenientes de sistemas de produção convencional (PROTESTE, 2016).

Em 14% das amostras analisadas, os níveis de pesticidas determinados estavam acima dos valores máximos permitidos pela ANVISA. Além disso, em 37% destas amostras foram detectadas substâncias não autorizadas para uso no Brasil. De acordo com os resultados apresentados, a amostra com maior quantidade de pesticidas foi o pimentão, em concentração e no número de contaminantes determinados. Ao todo, foram determinados 19 resíduos de pesticidas, sendo que 9 destes não são de uso permitido no Brasil, pela ANVISA (PROTESTE, 2016).

Conforme já citado, a adição de vermicomposto auxilia no desenvolvimento do pimentão e de outras culturas, promovendo o crescimento de plantas mais fortes que dispensam o uso — ou que diminua a demanda — de pesticidas e outros defensivos agrícolas, além de reduzir o manejo exacerbado do solo (Santos et al., 2010; Gopinath et al., 2009; Herman et al., 2008; Lago et al., 2006; Silva et al., 2002). Assim, o presente trabalho teve como motivação apresentar um insumo alternativo (vermicompostos) para o uso e aplicação na agricultura orgânica e familiar, sendo este um contraponto ao uso indiscriminado de pesticidas, com foco no meio ambiente, na saúde pública e na segurança alimentar.

³ Os resultados quantitativos são de uso interno da PROTESTE e ANVISA e não foram disponibilizados para consulta pública. Embora tenham sido solicitados, os documentos e laudos não foram fornecidos, apenas a conclusão das investigações, divulgada por meio de nota pública e reportagem, devidamente referenciada (PROTESTE, 2016).

2. OBJETIVOS DO CAPÍTULO III

Este capítulo tem como objetivo principal avaliar os efeitos da aplicação de vermicompostos no cultivo orgânico de pimentão *Capsicum annuum* em ambiente protegido. Além disso, avaliar os impactos desta adição no desenvolvimento e produção de frutos, assim como investigar a dinâmica do Cr — proveniente dos resíduos de curtume — por meio de sua distribuição nos tecidos e órgãos vegetais.

Como objetivos específicos propõem-se:

- a. Avaliar a aplicação dos vermicompostos em diferentes concentrações, conforme recomendação agronômica, no cultivo orgânico do pimentão e estudar seu efeito no desenvolvimento das plantas e produção de frutos verdes e maduros (pimentão vermelho);
 - b. Monitorar o desenvolvimento das culturas de pimentão por meio de seu crescimento e dados relacionados, por exemplo, a altura, folhas, frutos etc.;
 - c. Monitorar os períodos de floração e o tempo para a formação dos frutos verdes e maduros, assim como suas características morfológicas, relacionando-os à quantidade e ao tipo de vermicomposto adicionado;
 - d. Realizar os mesmos experimentos com um substrato controle (apenas o solo) e de referência (solo com adição de fertilizante mineral NPK), e comparar os resultados obtidos nos diferentes ensaios;
 - e. Investigar a dinâmica do Cr nas plantas de pimentão por meio de sua transferência do solo à planta e seu transporte ao longo dos tecidos e órgãos vegetais, principalmente nos frutos, a fim de garantir a saúde e segurança alimentar.
-

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Solo

Amostras de latossolo amarelo distrófico (LAd) foram coletadas no Campus II da Universidade de São Paulo (21°59'51"S 47°56'20"W). Utilizando um trator, o solo foi perfurado a ~ 160,0 cm de profundidade e 1,0 t de solo foi coletado a ~ 40,0 cm — fração arável (Figura 1 — III). Em seguida, o material foi peneirado a 2,0 mm e seco ao ar. As coletas e preparo do solo foram realizadas no mês de fevereiro de 2014, com temperatura média de 24°C e precipitação de 198 mm.

Para caracterizar o solo foram determinados os seguintes atributos (Anexo M1 — Metodologias para Análises Químicas e Anexo M3 — Outras Metodologias de Análise):

- i. pH
- ii. Matéria orgânica (MO)
- iii. Carbono orgânico total (TOC)
- iv. Capacidade de troca catiônica (CTC)
- v. Saturação por bases (V%)
- vi. Macro e micronutrientes
- vii. Distribuição das frações granulométricas (PSD)
- viii. Classe textural

Essas análises foram realizadas com o intuito de verificar o tipo de solo utilizado (LAd), o qual deveria ser pobre em MO e apresentar uma baixa V%. Uma vez que este solo apresente deficiência nutricional para as plantas, o potencial agrônomo dos vermicompostos poderá ser observado no cultivo de pimentão.

3.2. Semeaduras comerciais

Mudas de pimentão foram adquiridas na empresa SouAgro — Sociedade Agropecuária (São Carlos, SP). Cada muda apresentava ~ 3,0 cm de altura e ~ 30 dias de plantio. As sementeiras foram realizadas em um substrato comercial de fibra de coco e casca de pinus (Bioplant) e foram regadas manualmente, diariamente.

Ao atingir 5,0 cm de altura e ao menos 5 folhas permanentes, além de aparência saudável, as mudas foram transplantadas para potes plásticos de 0,5 L, utilizando o mesmo substrato comercial. Já com 10,0 cm, as plantas foram transportadas para os vasos de 25,0 L para o início dos experimentos.

3.3. Cultivo dos pimentões em sistema protegido

3.3.1. Montagem dos experimentos

Os experimentos de cultivo de pimentão foram realizados em casa de vegetação — sistema protegido, localizada no Campus II da Universidade de São Paulo (22°00'02"S 47°55'43"W), entre os meses de março a junho de 2014, com temperatura média de 23°C, 21°C, 19°C e 17°C; e precipitação de 176, 68, 65 e 35 mm, nos meses de março, abril, maio e junho respectivamente (Figura 2 — III).

Cada muda foi cultivada em vasos de 25,0 L contendo 20,0 L de substrato. Avaliou-se o cultivo de pimentão em diferentes tipos de substrato.

a.

b.

c.

d.

Figura 1 — III. Coleta e preparo do solo utilizado no cultivo de pimentão; a. Coleta do solo a 40 cm de profundidade utilizando um trator; b. Medição da profundidade; c. Transporte do solo para casa de vegetação, utilizando um trator; d. Preparo do solo.

FONTE: Autoria própria.

3.3.2. Planejamento experimental

Para organização dos experimentos, os vasos foram distribuídos de forma aleatória sobre as bancadas. No total foram 42 vasos distribuídos em 2 bancadas, construídas a partir de 2 tábuas sobre 3 cavaletes, com tamanho de $6,0 \times 0,6$ m. Ao todo, 24 vasos foram organizados em um sistema 2×12 (coluna $\times$ linha) e os outros 14 vasos em 2×7 (coluna $\times$ linha); cada coluna correspondeu a uma tábua. A distância entre os vasos era de 10,0 cm e suas posições foram alteradas semanalmente. Alteraram-se as posições a fim de minimizar as possíveis influências externas, como sombra, ventos etc.

a.

b.

c.

d.

Figura 2 — III. Casa de vegetação na qual foram conduzidos os experimentos de cultivo de pimentão em sistema protegido; a. Construção da casa de vegetação, em março de 2014; b. Vista do interior da casa de vegetação; c. Observação e tomada de notas acerca do crescimento dos frutos; d. Vista do cultivo de pimentão, 75 dias após o plantio.

FONTE: Autoria própria.

Os diferentes tipos de substratos determinaram as amostras estudadas, no qual as mudas de pimentão foram cultivadas:

- i. GBP—LAd: Solo, sem tratamento prévio (amostra controle);
- ii. GBP—NPK: Solo e fertilizante mineral NPK 12:5:14 3,0% (V/V) (amostra referência);

iii. GBP—VRC: Solo e vermicomposto, nas concentrações 1,5, 3,0 e 6,0% (V/V).

As amostras GBP—VRC foram divididas de acordo com o tipo de vermicomposto utilizado:

iii.i. GBP—STD: Solo e vermicomposto controle (VRC—STD), sem adição de resíduos de curtume;

iii.ii. GBP—L: Solo e vermicomposto produzido com lodo de curtume (VRC—L);

iii.iii. GBP—A: Solo e vermicomposto produzido com aparas curtidas de couro wet-blue (VRC—A);

iii.iv. GBP—AL: Solo e vermicomposto produzido com lodo e aparas curtidas de couro wet-blue (VRC—AL).

O experimento foi conduzido em triplicata, ou seja, três plantas foram cultivadas para cada amostra.

3.3.3. Rega e cuidados com as plantas

O cultivo de pimentão foi monitorado diariamente, observando o surgimento de pragas e plantas invasoras. Para evitar a presença de pragas, um extrato aquoso de casca de laranja foi borrifado sobre as folhas, um repelente natural que afasta os insetos. As plantas invasoras foram eliminadas manualmente.

Utilizando um regador (rega manual), 1,0 L de água foi adicionado diariamente a cada planta, durante todo o experimento. O volume de 1,0 L foi determinado a partir do ponto de murcha, obtido por meio de testes preliminares.

Ao passo que as culturas foram se desenvolvendo, uma haste foi fixada e presa ao caule das plantas, a fim de suporta-las, principalmente em função do peso dos frutos.

3.4. Monitoramento do cultivo de pimentão verde

3.4.1. Crescimento

O crescimento das culturas de pimentão foi monitorado quinzenalmente utilizando uma trena métrica. Mediu-se a altura (tamanho do caule) das plantas a partir da base (substrato) até o ápice caulinar (ponto mais alto do caule).

Após o fim dos experimentos os caules foram removidos e seus talos, folhas e frutos retirados. Após lavados, os caules foram desidratados em estufa à 40°C para determinações futuras.

3.4.2. Folhas

Cada planta teve seu número de folhas fixas (abaixo do ápice) contabilizadas quinzenalmente e seu número anotado. No primeiro mês a contagem foi semanal.

A cada quinze dias mediu-se a largura (L) e o tamanho (h) das 5 maiores folhas de cada planta. A partir desses dados estimou-se a área média foliar (A) (Equação 1 — III) (Lorenzen et al., 2015).

Após os experimentos as folhas foram removidas, lavadas e desidratadas em estufa à 40°C para determinações futuras.

$$A = (0,6379 \times L \times h)^{0,9816}$$

(Equação 1 — III)

3.4.3. Frutos

Foram monitorados diariamente os períodos relacionados à floração e formação dos frutos verdes e maduros:

- i. Início da florescência, para o cálculo do tempo médio de floração (Figura 3 — III);
- ii. Início da formação do fruto, logo após queda das pétalas (Figura 3 — III);
- iii. Formação do fruto verde estável em tamanho e aparência (verde intenso) (Figura 3 — III);
- iv. Formação do fruto vermelho (maduro) estável em aparência (vermelho intenso por completo), para cálculo do tempo médio de maturação.

O tempo médio de floração foi calculado subtraindo-se os dias corridos entre a queda das pétalas e o surgimento da florescência. Calculou-se, em seguida, a média para todas as flores que originaram frutos em uma mesma planta.

O tempo médio de maturação foi calculado subtraindo-se os dias corridos entre a obtenção da coloração vermelha intensa do fruto e a formação completa do fruto verde. Calculou-se, em seguida, a média para todos os frutos maduros em uma mesma planta.

Frutos bem formados em aparência (forma e coloração) foram medidos em tamanho e circunferência, além de pesados. Em seguida, os frutos foram desidratados em estufa à 40°C para determinações futuras.

Frutos contendo anomalias ou com má formação foram contabilizados, porém não foram medidos e pesados.

Figura 3 — III. Estágios de formação do pimentão: florescência, queda das pétalas e desenvolvimento do fruto.

CRÉDITO: T. R. A. Silva

3.5. Monitoramento da dinâmica do Cr

A transferência do Cr do substrato à planta e seu transporte ao longo dos tecidos e órgãos compreende a dinâmica do Cr, a qual foi monitorada por meio de análises químicas (Anexo M2 — Metodologias para Determinação de Cr).

As análises de monitoramento do Cr ao longo da vermicompostagem (Capítulo I, item 4.4) indicaram a bioconversão do Cr (VI) a Cr (III), a valores não determinados ou abaixo do LOQ. Sendo assim, apenas o Cr (III) foi determinado.

No substrato, as análises do Cr (III) foram realizadas em 2 momentos, a saber:

- i.* Cr presente no substrato no início do cultivo, antes de serem transplantadas as mudas de pimentão; e
- ii.* Cr presente no substrato no final do cultivo, após a colheita dos pimentões;

O destino deste Cr sobressalente seria a planta. Para analisar suas possíveis regiões de depósitos, os teores de Cr (III) foram determinados nas seguintes partes das plantas:

- i.* Raiz;
 - ii.* Caule e talos;
 - iii.* Folhas; e
 - iv.* Frutos.
-

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização do solo

O solo utilizado neste experimento apresentou características típicas de um LAd, ou seja, pobre em MO (1,52%) e TOC (0,25%), além de um baixo V% (27,99%) (EMBRAPA, 2006b). No que se refere à sua distribuição das frações granulométricas (PSD), o solo foi classificado como franco-argiloarenoso (Camargo et al., 2009; UN-FAO, 2006), em função do alto teor de areia (58,00%) e de argila (31,00%) (Tabela 1 — III).

Quanto aos nutrientes, o solo coletado apresentou baixos níveis de elementos essenciais às plantas. Logo, não satisfazem a nutrição dos vegetais para fins agrícolas. É o caso dos teores do K (0,33 cmol_c kg⁻¹), Ca (13,03 cmol_c kg⁻¹) e Mg (4,81 cmol_c kg⁻¹), que são as bases trocáveis. Já para os micronutrientes, as maiores concentrações observadas foram para os elementos Mn (337,21 mg kg⁻¹) > Zn (191,26 mg kg⁻¹) > Cu (179,03 mg kg⁻¹) > Fe (59,19 mg kg⁻¹). Os teores de Na e demais micronutrientes foram determinados abaixo do limite de quantificação (LOQ) (Tabela 2 — III).

Tabela 1 — III. Características químicas e granulométrica do solo utilizado no cultivo de pimentão.

	LAd
pH	5,74 ± 0,04
MO %	1,52 ± 0,31
TOC %	0,25 ± 0,12
CTC cmol _c kg ⁻¹	64,91
A cmol _c kg ⁻¹	46,74
B cmol _c kg ⁻¹	18,17
V%	27,99
PSD	
Areia Grossa %	3,00
Areia Média %	28,00
Areia Fina %	27,00
Silte %	11,00
Argila %	31,00
Classe Textural	Franco-argiloarenoso

LEGENDA: LAd Latossolo amarelo distrófico, MO Matéria orgânica, TOC Carbono orgânico total, CTC Capacidade de troca catiônica, A Acidez trocável, B Bases trocáveis, V% Saturação por bases, PSD Distribuição das frações granulométricas.

Tabela 2 — III. Macro e micronutrientes determinados no solo utilizado no cultivo de pimentão.

	LAd
N %	1,23
P %	1,02
K cmol _c kg ⁻¹	0,33
Ca cmol _c kg ⁻¹	13,03
Mg cmol _c kg ⁻¹	4,81
Na cmol _c kg ⁻¹	n.d.
B mg kg ⁻¹	n.d.
Cu mg kg ⁻¹	179,03
Mn mg kg ⁻¹	337,21
Zn mg kg ⁻¹	191,26
Fe mg kg ⁻¹	59,19

LEGENDA: LAd Latossolo amarelo distrófico. n.d. Não determinado.

4.2. Avaliação do potencial nutritivo dos vermicompostos e fertilizante mineral NPK

A avaliação do potencial nutritivo dos vermicompostos se deu por meio da análise dos teores de seus nutrientes, macro e micro. Além disso, o fertilizante mineral NPK utilizado nos experimentos de referência (amostra GBP—NPK) teve seus teores de N, P e K verificados (Tabela 3 — III).

Tabela 3 — III. Macro e micronutrientes determinados nos vermicompostos utilizados no cultivo de pimentão (amostras GBR—VRC) e, também, análise do fertilizante mineral NPK (amostra GBP—NPK).

	NPK	VRC—STD	VRC—L	VRC—A	VRC—AL
N %	11,06	1,48	1,54	1,32	2,74
P %	5,89	0,70	0,63	0,63	0,59
K %	11,23	3,19	2,09	1,88	0,88
Ca %		1,76	2,11	1,49	1,38
Mg %		0,78	0,75	0,71	0,52
S %		0,45	0,49	0,40	0,36
B mg kg ⁻¹		4,90	35,01	577,67	145,93
Cu mg kg ⁻¹		6,40	33,47	602,28	171,93
Mn mg kg ⁻¹		2,13	35,90	570,22	145,74
Zn mg kg ⁻¹		0,01	40,68	499,17	160,47
Fe mg kg ⁻¹		1462,10	1605,11	1455,80	1614,03

LEGENDA: VRC—L Vermicomposto de lodo de curtume + substrato orgânico; VRC—A Vermicomposto de aparas curtidas + substrato orgânico; VRC—AL Vermicomposto da mistura de lodo e aparas + substrato orgânico; VRC—STD Vermicompostos controle, apenas o substrato orgânico; NPK Fertilizante mineral NPK 12:5:14.

A análise dos teores de N, P e K do fertilizante mineral verificou e comprovou que o produto comercial possuía concentrações de nutrientes próximas às especificações do fabricante (N 12,0%, P 5,0% e K 14,0%). O nutriente com a maior diferença entre os dados da embalagem e a concentração determinada foi o K (11,23%), com ~ 20% de diferença. Contudo, o DP da média (4,83%) contempla o percentual informado pelo fabricante. O mesmo ocorreu com os demais elementos, N (11,06%) e P (5,89%).

Em geral, na análise dos macronutrientes, os vermicompostos não apresentaram diferenças bruscas nos teores determinados entre si. A ausência de replicatas não permitiu uma análise crítica e detalhada dos resultados. Contudo, os dados obtidos permitiram inferir sobre o potencial nutritivo dos vermicompostos e seu papel na fertilidade dos substratos.

Analisando os teores dos macronutrientes, a amostra VRC—STD apresentou maiores concentrações de P (0,70%), K (3,19%) e Mg (0,78%). Já a amostra VRC—L apresentou valores mais elevados de Ca (2,11%) e S (0,49%). A amostra VRC—A não apresentou nenhum valor acima das demais amostras, e apresentou o menor valor de N (1,32%). Já a amostra VRC—AL apresentou os menores valores na comparação entre todas as amostras: P (0,59%), K (0,88%), Ca (0,52%) e S (0,36%). Apesar de serem diferentes, as concentrações não ultrapassaram 1,00% em todos os valores determinados.

Na comparação entre os teores dos micronutrientes, as diferenças observadas foram exorbitantes. Em todos os casos — exceto para o Fe, as concentrações determinadas na amostra VRC—A estiveram muito acima das demais: B (577,67 mg kg⁻¹), Cu (602,28 mg kg⁻¹), Mn (570,22 mg kg⁻¹) e Zn (499,17 mg kg⁻¹). Estes valores foram aproximadamente 5 vezes

maiores que os determinados na amostra VRC—AL. Porém, os valores observados nestas duas amostras são até dez mil vezes maiores aos determinados nas amostras VRC—STD e VRC—L. Neste sentido, os micronutrientes foram determinados em maior quantidade em VRC—A > VRC—AL > VRC—L > VRC—STD.

4.3. Monitoramento do cultivo de pimentão verde

Critérios foram estabelecidos para que as mudas — adquiridas de sementes comerciais — fossem transferidas das bandejas para os potes plásticos e, em seguida, para os vasos: 5 e 10 cm de altura, respectivamente. Decorreram aproximadamente 7 e 30 dias entre cada transferência (Figura 4 — III). O início dos experimentos deu-se a partir da transferência para os vasos (tempo = 0 dias).

Em geral, as amostras GBP—LAd e GBP—NPK apresentaram plantas com desenvolvimento nitidamente inferior aos das amostras do grupo GBP—VRC. Plantas cultivadas em substratos contendo vermicompostos cresceram e produziram mais frutos, os quais eram de melhor aparência, com maior peso e dimensões. Em geral, quanto maior a quantidade de vermicomposto, maior foi a produção (número de frutos) e a saúde das plantas (análise visual).

O desenvolvimento das culturas de pimentão nas amostras GBP—LAd (Figura 5 — III) e GBP—NPK (Figura 6 — III) (amostras de referência) foram semelhantes, porém, apenas a amostra GBP—NPK produziu frutos. Em seguida, é apresentado o desenvolvimento das culturas de pimentão sob aplicação do vermicomposto AL em LAd, amostras VRC—1,5%—AL (Figura 7 — III), VRC—3,0%—AL (Figura 8 — III) e VRC—6,0%—AL (Figura 9 — III), durante 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de experimento.

Os resultados relacionados ao desenvolvimento das plantas de pimentão (altura, área foliar, produção de frutos etc.) foram apresentados nos itens a seguir.

a.

b.

c.

d.

e.

Figura 4 — III. Manuseio e cultivo das mudas de pimentão; a. Mudas de pimentão com 5 cm de altura na bandeja comercial; b. Mudas de pimentão com 5,0 cm de altura em potes plásticos; c. Mudas de pimentão com 10,0 cm de altura, prontas para o início dos experimentos; d. Preparo para início dos experimentos; e. Início dos experimentos de cultivo de pimentão em sistema protegido.

FONTE: Autoria própria.

1 Dia

15 Dias

30 Dias

45 Dias

60 Dias

90 Dias

Figura 5 — III. Crescimento das culturas de pimentão em latossolo amarelo distrófico (amostra controle GBP—LAd) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.

FONTE: Autoria própria.

Figura 6 — III. Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação de fertilizante mineral NPK (amostra referência, GBP—NPK) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.

FONTE: Autoria própria.

1 Dia

15 Dias

30 Dias

45 Dias

60 Dias

90 Dias

1 Dia

15 Dias

30 Dias

45 Dias

60 Dias

90 Dias

Figura 7 — III. Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.

FONTE: Autoria própria.

Figura 8 — III. Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.

FONTE: Autoria própria.

1 Dia

15 Dias

30 Dias

45 Dias

60 Dias

90 Dias

1 Dia

15 Dias

30 Dias

45 Dias

60 Dias

90 Dias

Figura 9 — III. Crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) nos tempos 1, 15, 30, 45, 60 e 90 dias de cultivo.

FONTE: Autoria própria.

4.3.1. Crescimento

As culturas de pimentão em latossolo amarelo distrófico (GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral NPK (GBP—NPK) não apresentaram diferenças significativas entre seus crescimentos (One-way ANOVA, $P < 0,05$). As amostras GBP—LAd e GBP—NPK apresentaram crescimentos médios de 12,7 e 19,0 cm, respectivamente, ~ 30% de diferença entre os resultados (Tabela 4 — III). Ou seja, estatisticamente, a adição de fertilizante NPK não interferiu no crescimento das plantas. Estatisticamente, os dados de crescimento obtidos nas amostras GBP—LAd e GBP—NPK são diferentes de todos os das demais amostras (GBP—VRC em todas as concentrações estudadas) (One-way ANOVA, $P < 0,05$).

As plantas cultivadas sob aplicação dos vermicompostos STD nas concentrações de 1,5%, 3,0% e 6,0% (amostras GBP—1,5%—STD, GPB—3,0%—STD e GBP—6,0%—STD), após 120 dias dos experimentos, não apresentaram diferenças significativas em seu crescimento (One-way ANOVA, $P < 0,05$). A diferença entre os crescimentos das plantas foi de ~ 6-28%, com crescimento médio entre 32,0-41,0 cm (Tabela 5 — III).

Analisando o crescimento das plantas sob aplicação do vermicomposto L, as amostras GBP—1,5%—L e GBP—3,0%—L não apresentaram diferenças significativas em seus crescimentos médios, 24,7 e 30,3 cm (~ 22% de diferença), respectivamente (Tabela 6 — III). Ambos os resultados são estatisticamente diferentes quando comparados com a amostra GBP—6%—L, com crescimento médio de 43,7 cm (One-way ANOVA, $P < 0,05$).

Quando aplicado o vermicomposto A, as amostras GBP—3,0%—A e GBP—6,0%—A apresentaram plantas com crescimentos médios de 45,0 e 49,7 cm, respectivamente (~ 10% de diferença), estatisticamente iguais (Tabela 7 — III). Sob aplicação de 1,5% do vermicomposto A, as plantas da amostra GBP—1,5%—A cresceram em média 32,0 cm, estatisticamente diferentes das demais (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Estatisticamente, os resultados obtidos para o crescimento das plantas cultivadas com aplicação do vermicomposto AL são iguais aos obtidos para a amostra A, em todas as respectivas concentrações (GBP—1,5%—A, GBP—3,0%—A e GBP—6,0%—A) (Tabela 8 — III).

Em geral, todos os vermicompostos nas concentrações de 1,5% apresentaram crescimentos estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Dentre as amostras cultivadas, as que apresentaram maior crescimento foram GBP—6,0%—A e GBP—6,0%—AL. Para as amostras do grupo GBP—VRC, o crescimento das culturas foi proporcional a concentração de vermicomposto ($1,5\% < 3,0\% < 6,0\%$).

Tabela 4 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral do tipo NPK (amostra GBP—NPK). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).

	Quinzena									MÉDIA
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
GBP—LAd1	10,5	11,0	12,0	12,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	12,7a $\pm$ 0,6
GBP—LAd2	9,8	10,5	11,0	12,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	
GBP—LAd3	10,8	11,0	11,0	11,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	
GBP—NPK1	9,7	10,4	12,0	13,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	19,0a $\pm$ 6,1
GBP—NPK2	11,0	12,0	12,5	13,0	16,0	16,0	16,0	22,0	26,0	
GBP—NPK3	10,5	12,0	14,0	14,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 4 — III até a Tabela 8 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK.

Tabela 5 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).

	Quinzena									MÉDIA
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
GBP—1,5%—STD1	10,4	13,5	16,5	19,0	20,0	23,0	23,0	23,0	24,0	32,0cd $\pm$ 11,4
GBP—1,5%—STD2	11,0	12,8	17,0	20,0	23,0	23,0	23,0	25,0	27,0	
GBP—1,5%—STD3	8,9	11,0	16,0	21,0	26,0	32,0	34,0	38,0	45,0	
GBP—3,0%—STD1	8,6	12,5	18,0	25,0	33,0	33,0	33,0	33,0	34,0	34,0cd $\pm$ 3,0
GBP—3,0%—STD2	8,8	10,8	16,0	22,0	29,0	29,0	29,0	31,0	31,0	
GBP—3,0%—STD3	11,5	15,5	22,0	27,5	29,0	30,0	33,0	31,0	37,0	
GBP—6,0%—STD1	10,6	13,0	18,0	25,0	25,0	25,0	25,0	27,0	28,0	41,0de $\pm$ 11,4
GBP—6,0%—STD2	10,0	13,8	20,0	31,0	38,0	43,0	46,0	49,0	49,0	
GBP—6,0%—STD3	11,1	14,0	19,5	29,0	39,0	44,0	44,0	44,0	46,0	

Médias seguidos pela mesma letra, da Tabela 4 — III até a Tabela 8 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 10 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 6 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).

	Quinzena									MÉDIA
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
GBP—1,5%—L1	10,0	12,0	17,0	20,0	20,0	24,0	25,0	26,0	28,0	24,7bc $\pm$ 2,9
GBP—1,5%—L2	8,8	11,0	15,5	18,0	22,0	22,0	23,0	23,0	23,0	
GBP—1,5%—L3	12,0	13,0	18,5	18,5	20,0	20,0	22,0	23,0	23,0	
GBP—3,0%—L1	9,9	14,0	19,5	24,0	24,0	24,0	24,0	27,0	28,0	30,3c $\pm$ 4,0
GBP—3,0%—L2	10,9	14,0	20,0	28,0	30,0	32,0	32,0	35,0	35,0	
GBP—3,0%—L3	12,4	14,0	22,0	23,0	25,0	26,0	26,0	27,0	28,0	
GBP—6,0%—L1	12,0	16,0	23,0	32,0	33,0	40,0	40,0	41,0	41,0	43,7e $\pm$ 2,3
GBP—6,0%—L2	8,2	12,0	17,5	27,0	37,0	37,0	38,0	43,0	45,0	
GBP—6,0%—L3	11,5	15,0	16,0	31,0	37,0	40,0	45,0	45,0	45,0	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 4 — III até a Tabela 8 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 11 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 7 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—A). A última coluna apresenta a média ± desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).

	Quinzena									MÉDIA
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
GBP—1,5%—A1	12,9	14,5	17,5	22,0	25,0	25,0	25,0	30,0	30,0	32,0cd ± 2,6
GBP—1,5%—A2	9,5	14,0	18,0	28,0	33,0	33,0	33,0	35,0	35,0	
GBP—1,5%—A3	8,4	11,5	16,0	22,0	25,0	27,0	27,0	31,0	31,0	
GBP—3,0%—A1	11,2	15,3	22,0	30,0	36,0	36,0	36,0	42,0	43,0	45,0e ± 4,4
GBP—3,0%—A2	11,1	15,0	22,5	30,5	36,0	40,0	40,0	40,0	42,0	
GBP—3,0%—A3	9,8	13,5	19,5	30,0	37,0	37,0	37,0	49,0	50,0	
GBP—6,0%—A1	10,0	14,0	22,0	30,0	40,0	52,0	53,0	53,0	54,0	49,7e ± 3,8
GBP—6,0%—A2	9,3	13,0	17,5	29,0	36,0	39,0	40,0	46,0	48,0	
GBP—6,0%—A3	9,5	13,5	20,0	31,0	40,0	41,0	42,0	46,0	47,0	

Médias seguidos pela mesma letra, da Tabela 4 — III até a Tabela 8 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.
LEGENDA: GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 12 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—A) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 8 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para o crescimento obtido na 8ª quinzena (120 dias) de cultivo. Unidades em centímetro (cm).

	Quinzena									MÉDIA
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
GBP—1,5%—AL1	7,9	10,2	11,5	13,0	17,0	17,0	20,0	23,0	24,0	25,7bc $\pm$ 2,1
GBP—1,5%—AL2	8,7	10,0	12,0	12,5	15,0	18,0	20,0	25,0	25,0	
GBP—1,5%—AL3	10,5	12,0	16,0	22,0	22,0	26,0	26,0	26,0	28,0	
GBP—3,0%—AL1	10,6	14,2	20,0	29,0	36,0	40,0	50,0	50,0	50,0	44,0e $\pm$ 5,2
GBP—3,0%—AL2	9,9	12,5	17,5	26,0	36,0	40,0	41,0	41,0	41,0	
GBP—3,0%—AL3	10,2	12,3	18,0	25,0	30,0	38,0	40,0	41,0	41,0	
GBP—6,0%—AL1	10,5	14,0	21,0	33,0	40,0	50,0	50,0	50,0	50,0	49,7e $\pm$ 2,5
GBP—6,0%—AL2	11,1	14,5	22,0	32,0	44,0	47,0	47,0	47,0	47,0	
GBP—6,0%—AL3	9,1	12,0	18,0	28,0	40,0	49,0	49,0	52,0	52,0	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 4 — III até a Tabela 8 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 13 — III. Monitoramento quinzenal do crescimento das culturas de pimentão em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

4.3.2. Folhas

Dados relacionados às folhas (quantidade, área estimada, características morfológicas e nutrientes) foram atributos importantes para monitorar e qualificar o desenvolvimento das culturas de pimentão nos diferentes tipos de substrato. Desde o início dos experimentos (~ 15 dias após o plantio) já era possível observar, entre os diferentes tipos de amostra, a singularidade nas dimensões das folhas. Aos 45 dias, enquanto as folhas das amostras GBP—LAd e GBP—NPK se mantiveram do mesmo tamanho, a amostra GBP—6,0%—AL apresentava folhas com dimensões maiores que uma mão (Figura 14 — III).

GBP—LAd

GBP—NPK

GBP—6,0%—AL

Figura 14 — III. Comparação entre as dimensões das folhas de pimentão verde cultivados em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd), com adição de fertilizante NPK (amostra GBP—NPK) e com adição do vermicomposto AL na concentração de 6% (amostra GBP—6,0%—AL) após 45 dias de plantio.

FONTE: Autoria própria.

Com relação à aparência das folhas, uma coloração verde-amarelada foi observada na amostra GBP—LAd a partir do ~ 5º dia de cultivo, persistindo pelo restante do experimento. O mesmo ocorreu com as amostras do grupo GBP—VRC que receberam 1,5% de vermicomposto, porém após ~ 45 dias de experimento. Já nas concentrações de 3,0 e 6,0% o amarelamento das folhas se deu com 75 e 90 dias de cultivo, respectivamente.

A amostra GBP—NPK não apresentou alteração na coloração de suas folhas. Desde o início dos experimentos foi observada uma coloração verde intensa que se manteve durante todo o desenvolvimento das plantas. Embora a aplicação do fertilizante mineral NPK não tenha contribuído significativamente para o desenvolvimento das plantas, garantiu sua nutrição vegetal em todos os seus estágios de desenvolvimento.

Em termos da quantidade, o número de folhas variou dependendo do tipo de substrato. Após a 4ª quinzena, na amostra GBP—LAd foram observadas de 5 a 9 folhas e, na amostra GBP—NPK, contabilizaram-se de 15 a 29 folhas (Tabela 9 — III). Embora diferentes, ambos os valores são estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$). As amostras que receberam adição de vermicomposto (GBP—VRC) variaram proporcionalmente em função da quantidade de vermicomposto: quanto maior a concentração, maior o número de folhas (Tabela 10 — III a Tabela 13 — III). Em geral, as plantas que receberam 1,5% de vermicomposto obtiveram um resultado estatisticamente igual ao obtido em GBP—NPK, porém diferentes

dos valores observados em GBP—LAd (One-way ANOVA, $P < 0,05$). O número de folhas contadas nas amostras que receberam 3,0 e 6,0% de vermicomposto são estatisticamente iguais em todas as amostras, com exceção das amostras VRC—3,0%—AL e VRC—6,0%—AL, que apresentaram um número expressivo de folhas, 48,6 e 62,3, respectivamente (Tabela 13 — III) (One-way ANOVA, $P < 0,05$).

A contagem de folhas seguiu por 60 dias (4 quinzenas), após esse período o número de folhas se manteve constante. O mesmo ocorreu com a medição das dimensões das folhas (largura e tamanho).

Tabela 9 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral do tipo NPK (amostra GBP—NPK). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4^o quinzena (60 dias) de cultivo.

	Quinzena					MÉDIA
	0	1	2	3	4	
GBP—LAd1	8	7	6	5	7	7,6a $\pm$ 1,2
GBP—LAd2	6	6	8	7	9	
GBP—LAd3	7	8	6	7	7	
GBP—NPK1	6	7	6	13	23	22,3ab $\pm$ 7,0
GBP—NPK2	7	8	7	8	29	
GBP—NPK3	7	8	7	13	15	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 9 — III até a Tabela 13 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK.

Tabela 10 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena (60 dias) de cultivo.

	Quinzena					MÉDIA
	0	1	2	3	4	
GBP—1,5%—STD1	6	8	12	16	23	28,3bcd $\pm$ 6,1
GBP—1,5%—STD2	6	9	12	16	27	
GBP—1,5%—STD3	6	7	6	16	35	
GBP—3,0%—STD1	8	9	12	23	50	35,3bcde $\pm$ 12,7
GBP—3,0%—STD2	4	8	10	17	29	
GBP—3,0%—STD3	8	10	12	18	27	
GBP—6,0%—STD1	6	9	13	18	20	37,6cde $\pm$ 15,4
GBP—6,0%—STD2	7	11	14	24	45	
GBP—6,0%—STD3	7	9	11	18	48	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 9 — III até a Tabela 13 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 15 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 11 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena (60 dias) de cultivo.

	Quinzena					MÉDIA
	0	1	2	3	4	
GBP—1,5%—L1	6	8	12	14	20	20,6ab $\pm$ 0,6
GBP—1,5%—L2	6	8	10	14	21	
GBP—1,5%—L3	8	7	10	11	21	
GBP—3,0%—L1	8	11	13	17	28	28,0bcd $\pm$ 7,0
GBP—3,0%—L2	7	12	16	19	35	
GBP—3,0%—L3	7	9	11	14	21	
GBP—6,0%—L1	9	12	15	22	45	47,0e $\pm$ 4,4
GBP—6,0%—L2	6	9	13	20	44	
GBP—6,0%—L3	8	11	15	28	52	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 9 — III até a Tabela 13 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 16 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 12 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4^o quinzena (60 dias) de cultivo.

	Quinzena					MÉDIA
	0	1	2	3	4	
GBP—1,5%—A1	8	10	13	16	21	26,6bcd $\pm$ 4,9
GBP—1,5%—A2	6	9	12	18	29	
GBP—1,5%—A3	6	9	13	15	30	
GBP—3,0%—A1	5	11	15	23	56	39,3de $\pm$ 17,6
GBP—3,0%—A2	7	9	14	17	21	
GBP—3,0%—A3	6	10	11	24	41	
GBP—6,0%—A1	6	11	16	20	46	46,6e $\pm$ 6,0
GBP—6,0%—A2	6	10	14	33	53	
GBP—6,0%—A3	6	10	13	33	41	

Médias seguidos pela mesma letra, da Tabela 9 — III até a Tabela 13 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 17 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 13 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos na 4ª quinzena (60 dias) de cultivo.

	Quinzena					MÉDIA
	0	1	2	3	4	
GBP—1,5%—AL1	9	9	9	12	31	25,6bcd $\pm$ 4,7
GBP—1,5%—AL2	5	7	8	9	24	
GBP—1,5%—AL3	8	8	10	12	22	
GBP—3,0%—AL1	6	11	16	24	43	48,6ef $\pm$ 5,1
GBP—3,0%—AL2	6	7	13	24	53	
GBP—3,0%—AL3	6	9	10	20	50	
GBP—6,0%—AL1	8	11	20	29	62	62,3f $\pm$ 1,5
GBP—6,0%—AL2	8	11	18	27	64	
GBP—6,0%—AL3	6	10	11	38	61	

Médias seguidos pela mesma letra, da Tabela 9 — III até a Tabela 13 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 18 — III. Monitoramento quinzenal do número de folhas de pimentão cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Quanto à estimativa da área foliar (A), calculada a partir das dimensões das folhas — tamanho e largura, os resultados obtidos são proporcionais ao número de folhas e demais dados relacionados ao desenvolvimento das plantas de pimentão.

As folhas obtidas de plantas cultivados em latossolo amarelo distrófico (GBP—LAd) apresentaram áreas significativamente menores quando comparadas às demais amostras (8,33 cm²), após 60 dias de cultivo (Tabela 14 — III) (One-way ANOVA, $P < 0,05$).

A amostra GBP—NPK e todas do grupo GBP—VRC na concentração de 1,5% (GBP—1,5%—STD, GBP—1,5%—L, GBP—1,5%—A e GBP—1,5%—AL) apresentaram folhas com áreas estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$), com valores variando entre 23,82 e 31,27 cm² (da Tabela 14 — III a Tabela 18 — III).

Se tratando das plantas que receberam o vermicomposto STD, a amostra GBP—1,5%—STD (27,24 cm²) apresentou áreas estatisticamente diferentes das demais (GBP—3,0%—STD, 43,12 cm² e GBP—6,0%—STD, 60,73 cm²), com variações de ~ 90%, as quais não apresentaram diferenças estatisticamente diferentes (One-way ANOVA, $P < 0,05$), ~ 41% de diferença (Tabela 15 — III).

Os resultados obtidos nas plantas que receberam o vermicomposto A, indicam que as folhas apresentaram áreas estatisticamente iguais em GBP—1,5%—L (23,82 cm²) e GBP—3,0%—L (30,93 cm²), ~ 30% de diferença (One-way ANOVA, $P < 0,05$), as quais se diferenciaram em GBP—6,0%—L (66,43 cm²), ~ 140% de diferença (Tabela 16 — III).

As amostras GBP—A e GBP—AL apresentaram resultados estatisticamente iguais e foram os tratamentos que apresentaram folhas com dimensões maiores. Em ambas as amostras, as áreas obtidas eram estatisticamente diferentes entre todas as concentrações de vermicomposto analisadas e, também, entre todas as demais amostras estudadas (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Comparando os resultados obtidos, as amostras GBP—1,5%—AL e GBP—3,0%—AL apresentaram uma diferença de ~ 175% entre suas áreas; entre GBP—3,0%—AL e GBP—6,0%—AL, ~ 89% de diferença; e na comparação entre GBP—1,5%—AL e GBP—6,0%—AL, ~ 420% de diferença (Tabela 17 — III e Tabela 18 — III).

Tabela 14 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em latossolo amarelo distrófico (amostra GBP—LAd) e sob aplicação de fertilizante mineral do tipo NPK (amostra GBP—NPK). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo. Unidades em cm².

	Dias			MÉDIA
	15	30	45	
GBP—LAd1	10,35	10,35	3,63	8,33a $\pm$ 4,34
GBP—LAd2	16,79	13,49	12,17	
GBP—LAd3	13,93	9,76	9,18	
GBP—NPK1	14,98	23,98	26,22	29,80bc $\pm$ 4,33
GBP—NPK2	17,69	33,45	34,62	
GBP—NPK3	19,51	28,57	28,57	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 14 — III até a Tabela 18 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK.

Tabela 15 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo. Unidades em cm^2 .

	Dias			MÉDIA
	15	30	45	
GBP—1,5%—STD1	22,24	29,05	26,08	27,24c $\pm$ 1,03
GBP—1,5%—STD2	26,52	25,40	28,05	
GBP—1,5%—STD3	26,19	28,16	27,61	
GBP—3,0%—STD1	41,23	47,61	48,40	43,12cd $\pm$ 6,61
GBP—3,0%—STD2	41,70	42,42	45,26	
GBP—3,0%—STD3	33,51	34,47	35,70	
GBP—6,0%—STD1	43,65	41,76	51,83	60,73de $\pm$ 10,57
GBP—6,0%—STD2	60,39	58,51	72,41	
GBP—6,0%—STD3	48,20	54,72	57,93	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 14 — III até a Tabela 18 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 19 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto STD nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—STD), 3,0% (amostra GBP—3,0%—STD) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—STD) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 16 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo. Unidades em cm^2 .

	Dias			MÉDIA
	15	30	45	
GBP—1,5%—L1	20,22	25,05	28,72	23,82b $\pm$ 4,47
GBP—1,5%—L2	20,26	22,00	22,76	
GBP—1,5%—L3	17,65	19,97	19,97	
GBP—3,0%—L1	26,99	31,71	34,47	30,93bc $\pm$ 7,31
GBP—3,0%—L2	33,60	33,60	35,79	
GBP—3,0%—L3	21,23	22,07	22,53	
GBP—6,0%—L1	46,53	54,72	54,33	66,43ef $\pm$ 14,62
GBP—6,0%—L2	70,10	79,91	80,68	
GBP—6,0%—L3	54,12	57,41	62,28	

Médias seguidos pela mesma letra, da Tabela 14 — III até a Tabela 18 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 20 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto L nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—L), 3,0% (amostra GBP—3,0%—L) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—L) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 17 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo. Unidades em cm^2 .

	Dias			MÉDIA
	15	30	45	
GBP—1,5%—A1	24,92	26,99	26,99	31,27bc $\pm$ 3,86
GBP—1,5%—A2	28,66	30,28	32,36	
GBP—1,5%—A3	32,86	34,47	34,47	
GBP—3,0%—A1	43,65	46,92	49,59	55,26de $\pm$ 7,49
GBP—3,0%—A2	41,84	47,00	52,45	
GBP—3,0%—A3	43,80	60,78	63,75	
GBP—6,0%—A1	59,10	59,15	70,99	79,50f $\pm$ 10,36
GBP—6,0%—A2	68,85	73,28	76,48	
GBP—6,0%—A3	74,03	81,07	91,04	

Médias seguidas pela mesma letra, da Tabela 14 — III até a Tabela 18 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 21 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto A nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—A), 3,0% (amostra GBP—3,0%—A) e 6% (amostra GBP—6,0%—A) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

Tabela 18 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL). A última coluna apresenta a média $\pm$ desvio padrão para os resultados obtidos após 45 dias de cultivo. Unidades em cm^2 .

	Dias			MÉDIA
	15	30	45	
GBP—1,5%—AL1	15,65	20,88	20,88	24,69bc $\pm$ 7,14
GBP—1,5%—AL2	15,48	20,26	20,26	
GBP—1,5%—AL3	27,87	30,13	32,92	
GBP—3,0%—AL1	29,46	38,60	61,18	67,91ef $\pm$ 9,70
GBP—3,0%—AL2	51,17	56,63	63,52	
GBP—3,0%—AL3	65,03	72,99	79,03	
GBP—6,0%—AL1	124,02	134,56	153,19	128,35g $\pm$ 23,47
GBP—6,0%—AL2	101,21	121,84	125,30	
GBP—6,0%—AL3	86,37	96,40	106,55	

Médias seguidos pela mesma letra, da Tabela 14 — III até a Tabela 18 — III, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way

LEGENDA: GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Figura 22 — III. Estimativa quinzenal da área foliar dos pimentões cultivados em LAd com aplicação do vermicomposto AL nas concentrações de 1,5% (amostra GBP—1,5%—AL), 3,0% (amostra GBP—3,0%—AL) e 6,0% (amostra GBP—6,0%—AL) e comparação com as amostras controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK).

4.3.3. Análise foliar — Macro e micronutrientes

A análise foliar das plantas de pimentão se deu por meio da observação das folhas em forma, cor, textura, etc. (item 4.3.2 do Capítulo III) e pela determinação dos teores de macro (Tabela 19 — III) e micronutrientes (Tabela 20 — III).

Tabela 19 — III. Análise foliar (macro e micronutrientes) das plantas de pimentão cultivados em diferentes substratos, LAd, NPK e VRC. Parte I — Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S.

	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %
GBP—LAd	1,97	0,25	5,71	1,67	0,24	1,03
GBP—NPK	2,29	0,41	5,71	2,99	0,73	0,79
GBP—1,5%—STD	2,14	0,44	6,63	2,22	0,58	0,81
GBP—3,0%—STD	1,93	0,47	6,58	1,85	0,43	0,83
GBP—6,0%—STD	2,18	0,22	5,41	3,57	0,71	1,03
GBP—1,5%—L	1,83	0,32	5,01	3,11	0,71	1,14
GBP—3,0%—L	1,80	0,48	5,42	3,04	0,64	1,05
GBP—6,0%—L	1,50	0,67	5,73	2,13	0,51	0,92
GBP—1,5%—A	1,58	0,20	5,85	2,13	0,65	0,85
GBP—3,0%—A	1,85	0,51	5,62	2,48	0,67	0,94
GBP—6,0%—A	1,99	0,65	5,71	2,17	0,66	0,72
GBP—1,5%—AL	1,54	0,23	2,58	2,26	0,58	0,71
GBP—3,0%—AL	1,69	0,18	2,56	2,10	0,62	0,78
GBP—6,0%—AL	1,74	0,24	2,16	2,04	0,65	0,76

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK; GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD; GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L; GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A; GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL. 1,5% 3,0% 6,0% são as concentrações (V/V) de vermicomposto utilizadas no cultivo de pimentão.

Em geral, os teores de nutrientes variaram de forma aleatória, sem tender ao esperado: quanto maior o desenvolvimento das plantas (da Tabela 4 — III a Tabela 8 — III), menor deveria ser a concentração dos nutrientes — devido a diluição dos íons nos tecidos e órgãos vegetais (Malavolta et al., 1997; Malavolta, 1980). Contudo, exceções foram observadas.

No que se refere aos macronutrientes, na comparação entre as amostras controle e referência (GBP—LAd e GBP—NPK), as concentrações determinadas em GBP—NPK se mostraram superiores, conforme o esperado. Exceção para as concentrações de K (5,71%) — igual ao determinado na amostra controle — e S (0,79%), abaixo da concentração determinada em GBP—LAd (1,03%). Além disso, a adição de N, P e K provenientes do fertilizante mineral não garantiu à amostra GBP—NPK as maiores concentrações destes nutrientes na comparação entre todas as amostras estudadas, se restringindo apenas à concentração de N (2,29%). O maior valor de P foi determinado em GBP—6,0%—L (0,67%) e de K em GBP—1,5%—STD (6,63%).

As menores concentrações de macronutrientes foram determinadas nas amostras que receberam os vermicompostos VRC—AL e VRC—A, as quais apresentaram os menores valores de P (0,18% em GBP—3,0%—AL), K (2,16% em GBP—6,0%—AL) e S (0,71% em GBP—1,5%—AL). Uma vez que estas plantas se desenvolveram mais, era esperado que os valores observados fossem os menores, em função da diluição dos nutrientes nos tecidos vegetais (Malavolta et al., 1997).

Figura 23 — III. Variação dos teores foliares de N determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 24 — III. Variação dos teores foliares de P determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 25 — III. Variação dos teores foliares de K determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP-STD, GBP-L, GBP-A e GBP-AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 26 — III. Variação dos teores foliares de Ca determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP-STD, GBP-L, GBP-A e GBP-AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 27 — III. Variação dos teores foliares de Mg determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 28 — III. Variação dos teores foliares de S determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Tabela 20 — III. Análise foliar (macro e micronutrientes) das plantas de pimentão cultivados em diferentes substratos, LAd, NPK e VRC. Parte II — Micronutrientes: B, Cu, Mn, Zn e Fe.

	B mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹
GBP—LAd	88,25	1,36	294,63	100,30	1223,76
GBP—NPK	89,75	2,88	353,97	107,93	1002,25
GBP—1,5%—STD	85,04	0,13	157,44	99,93	738,69
GBP—3,0%—STD	72,65	0,23	133,19	88,09	577,78
GBP—6,0%—STD	164,12	1,44	375,32	145,84	1316,88
GBP—1,5%—L	116,46	0,57	211,31	99,25	1762,12
GBP—3,0%—L	104,06	0,54	203,55	102,22	1264,24
GBP—6,0%—L	57,26	1,97	127,09	102,95	858,62
GBP—1,5%—A	88,68	n.d.	277,32	104,61	762,32
GBP—3,0%—A	76,07	0,64	100,14	102,91	813,51
GBP—6,0%—A	50,64	0,04	245,17	101,82	861,84
GBP—1,5%—AL	78,21	0,67	492,57	143,87	1091,23
GBP—3,0%—AL	58,54	0,29	356,25	94,47	812,90
GBP—6,0%—AL	67,95	0,11	305,76	125,56	527,06

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK; GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD; GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L; GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A; GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto STD—AL. 1,5% 3,0% 6,0% é a concentração (V/V) de vermicomposto utilizada no cultivo de pimentão. n.d. Não determinado.

No que se refere aos micronutrientes, as concentrações variaram aleatoriamente, entre amostras e entre as concentrações de vermicompostos.

Em geral, as maiores concentrações de micronutrientes foram determinadas nas amostras que receberam o vermicomposto VRC—STD na concentração de 6,0% (GBP—6,0%—STD), as quais apresentaram maiores teores de B (164,12 mg kg⁻¹), Zn (145,84 mg kg⁻¹) e Fe (1316,88 mg kg⁻¹); e, também, nas amostras que receberam os vermicompostos VRC—AL, Cu (29,64 mg kg⁻¹ em GBP—3,0%—AL) e Mn (492,57 mg kg⁻¹ em GBP—3,0%—AL). Conforme já mencionado, esperava-se que quanto maior o desenvolvimento da planta, menor a concentração dos nutrientes. Contudo, as plantas que receberam o vermicomposto VRC—AL desenvolveram-se além das demais. Ou seja, as plantas que mais se desenvolveram também apresentaram os maiores teores de micronutrientes, pois mesmo diluídos, foram determinados em altas concentrações.

Além disso, as plantas que receberam os vermicompostos VRC—A também se desenvolveram mais, porém seus resultados estiveram de acordo com o esperado. Com exceção do Zn e do Fe, foram as amostras que apresentaram as menores concentrações de micronutrientes: B (50,64 mg kg⁻¹) e Cu (0,04 mg kg⁻¹) em GBP—6,0%—A; e Mn (100,14 mg kg⁻¹) em GBP—3,0%—A.

Figura 29 — III. Variação dos teores foliares de B determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 30 — III. Variação dos teores foliares de Cu determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 31 — III. Variação dos teores foliares de Mn determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 32 — III. Variação dos teores foliares de Zn determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

Figura 33 — III. Variação dos teores foliares de Fe determinados nos pimentões cultivados com adição dos vermicompostos GBP—STD, GBP—L, GBP—A e GBP—AL nas concentrações de 1,5, 3,0 e 6,0%.

4.3.4. Frutos

A produção de frutos, assim como suas características (dimensões, peso e aparência) foram atributos importantes para avaliar o efeito da adição dos vermicompostos no plantio de pimentão. Em geral, as plantas que receberam vermicompostos (amostras GBP—VRC) produziram frutos maiores e de melhor aparência. Além disso, os pimentões maduros apresentaram uma coloração vermelho intensa e homogênea ao redor dos frutos (da Figura 24 — III até a Figura 28 — III).

Em relação ao número de frutos, a amostra controle (GBP—LAd) não produziu pimentões (Tabela 3 — III). Já a amostra referência (GBP—NPK) produziu apenas 1 fruto por planta (Tabela 21 — III). Os melhores resultados foram obtidos nas amostras GBP—3,0%—AL (Tabela 32 — III) e GBP—6,0%—AL (Tabela 33 — III), as quais produziram 3 frutos por planta. Em seguida, colheram-se 2 frutos por planta nas amostras GBP—3,0%—A (Tabela 29 — III), GBP—6,0%—A (Tabela 30 — III) e GBP—6,0%—L (Tabela 27 — III). Nas demais amostra, cada planta produziu apenas 1 fruto (Tabela 22 — III a Tabela 31 — III).

Os dados acima citados referem-se aos frutos bem formados em forma e aparência, visivelmente sem anomalias. Algumas plantas produziram, além desses frutos, pimentões fora dos padrões de estética, com forma e coloração irregular, sem valor comercial. Os piores resultados foram observados nas amostras que receberam vermicompostos contendo resíduos de curtume (amostras GBP—VRC) na concentração de 1,5%: GBP—1,5%—L (Tabela 25 — III), GBP—1,5%—A (Tabela 28 — III) e GBP—1,5%—AL (Tabela 31 — III), a cada 2 frutos bem formados, 1 apresentou anomalia (50% da produção). Algumas amostras apresentaram significativamente mais frutos bem formados do que com anomalias (One-way ANOVA, $P < 0,05$), conforme foi observado em GBP—6,0%—AL (relação 5:1 — em um total de 10 frutos, 2 apresentaram anomalias) (Tabela 33 — III), GBP—3,0%—AL (relação 8:0) (Tabela 32 — III), GBP—6,0%—A (relação 6:0) (Tabela 30 — III), GBP—3,0%—A (relação 4:1) (Tabela 29 — III) e, também, as amostras GBP—3,0%—L e GBP—6,0%—L (ambas com relação 5:1) (Tabela 26 — III e Tabela 27 — III). Certas amostras apresentaram apenas frutos bem formados, é o caso de GBP—6,0%—A, GBP—3,0%—AL e a amostra referência, GBP—NPK.

GBP—NPK

Figura 34 — III. Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas em LAd com aplicação do fertilizante mineral NPK (amostra GBP—NPK).

FONTE: Autoria própria.

GBP—1,5%—STD

GBP—3,0%—STD

GBP—6,0%—STD

Figura 35 — III. Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas em LAd com aplicação do vermicomposto STD em diferentes concentrações (GBP—1,5%—STD, GBP—3,0%—STD e GBP—6,0%—STD).

FONTE: Autoria própria.

GBP—1,5%—L

GBP—3,0%—L

GBP—6,0%—L

Figura 36 — III. Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas em LAd com aplicação do vermicomposto L em diferentes concentrações (GBP—1,5%—L, GBP—3,0%—L e GBP—6,0%—L).

FONTE: Autoria própria.

GBP—1,5%—A

GBP—3,0%—A

GBP—6,0%—A

Figura 37 — III. Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas LAd com aplicação do vermicomposto A em diferentes concentrações (GBP—1,5%—AL, GBP—3,0%—A e GBP—6,0%—A).

FONTE: Autoria própria.

Figura 38 — III. Comparação entre os pimentões vermelhos (maduros) obtidos de plantas cultivadas LAd com aplicação do vermicomposto AL em diferentes concentrações (GBP—1,5%—AL, GBP—3,0%—AL e GBP—6,0%—AL).

FONTE: Autoria própria.

Quanto à formação dos frutos, observou-se que, quanto maior concentração do vermicomposto aplicado, menor foi o tempo de formação dos pimentões maduros, com exceção das amostras que receberam o vermicomposto A (Tabela 34 — III). Estatisticamente, todas as dosagens com aplicação do vermicomposto A apresentaram tempos iguais, entre 92-110 dias (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Além disso, todas as amostras que receberam 6,0% de vermicomposto (GBP—6,0%—STD, GBP—6,0%—L, GBP—6,0%—A e GBP—6,0%—AL), algumas amostras que receberam 3,0% de vermicomposto (GBP—3,0%—STD, GBP—3,0%—A e GBP—3,0%—AL) e, também, a amostra referência GBP—NPK, apresentaram tempos médios de maturação estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$), 87-105 dias.

Ao todo, frutos com menor tempo de maturação foram os que apresentaram maior peso, variando entre 100,8-134,5 g, com resultados estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Já os frutos obtidos com aplicação de 1,5% de vermicomposto apresentaram frutos com peso variando entre 23,1-46,7 g, valores estatisticamente diferentes (One-way ANOVA, $P < 0,05$). A diferença entre os pesos dos frutos nas amostras que receberam 1,5 e 6,0% de vermicomposto foi de ~ 480% (Tabela 34 — III).

Quanto às dimensões dos frutos, não é possível estabelecer uma relação entre seus tamanhos e suas circunferências, uma vez que frutos maiores podem apresentar uma circunferência menor e vice-versa. Além disso, não existe uma fórmula matemática genérica que relacione circunferência e tamanho no cálculo de uma área representativa. Em geral, as amostras que receberam 3,0 e 6,0% de vermicomposto foram os que produziram frutos com dimensões maiores, variando entre 10,5-12,5 cm em tamanho e 17,0-23,0 cm em circunferência, dentre os resultados estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Já nas amostras que receberam 1,5% de vermicomposto o tamanho dos frutos variou entre 6,0-8,0 cm e a circunferência entre 11,2-13,3 cm, dentre os resultados estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$) (Tabela 34 — III).

Tabela 21 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com fertilizante mineral NPK em LAd (amostra GBP—NPK): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—NPK1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maduração do fruto	97	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	12,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	19,0	-	-	-
	Peso _g	106,3	-	-	-
GBP—NPK2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	27	-	-	-
1	Maduração do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	10,0	-	-	-
	Circunferência _{cm}	18,0	-	-	-
	Peso _g	86,5	-	-	-
GBP—NPK3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	27	-	-	-
1	Maduração do fruto	109	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	11,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	20,3	-	-	-
	Peso _g	97,5	-	-	-

LEGENDA: GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 22 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto STD com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—STD): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—1,5%—STD1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	23	-	-	-
1	Maduração do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	7,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	10,5	-	-	-
	Peso _g	12,6	-	-	-
GBP—1,5%—STD2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	22	-	-	-
1	Maduração do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	10,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	13,0	-	-	-
	Peso _g	36,3	-	-	-
GBP—1,5%—STD3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	27	-	-	-
1	Maduração do fruto	132	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	14,2	-	-	-
	Circunferência _{cm}	16,3	-	-	-
	Peso _g	91,2	-	-	-

LEGENDA: GBP—1,5%—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD na concentração (V/V) de 1,5%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 23 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto STD com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—STD): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—3,0%—STD1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maturação do fruto	97	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	15,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	19,8	-	-	-
	Peso _g	136,9	-	-	-
GBP—3,0%—STD2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	25	28	-	-
2	Maturação do fruto	132	151	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	8,9	9,5	-	-
	Circunferência _{cm}	16,1	13,5	-	-
	Peso _g	71,4	44,1	-	-
GBP—3,0%—STD3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maturação do fruto	132	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	13,6	-	-	-
	Circunferência _{cm}	18,5	-	-	-
	Peso _g	119,6	-	-	-

LEGENDA: GBP—3,0%—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD na concentração (V/V) de 3,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 24 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto STD com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—STD): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—6,0%—STD1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maturação do fruto	97	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	8,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	19,5	-	-	-
	Peso _g	137,3	-	-	-
GBP—6,0%—STD2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	18	-	-	-
1	Maturação do fruto	97	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	12,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	21,4	-	-	-
	Peso _g	180,4	-	-	-
GBP—6,0%—STD3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	23	27	-	-
2	Maturação do fruto	109	132	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	11,0	11,4	-	-
	Circunferência _{cm}	16,6	17,7	-	-
	Peso _g	134,5	85,9	-	-

LEGENDA: GBP—6,0%—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD na concentração (V/V) de 6,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 25 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto L com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—L): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—1,5%—L1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	29	-	-	-
1	Maturação do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	6,0	-	-	-
	Circunferência _{cm}	12,5	-	-	-
	Peso _g	28,0	-	-	-
GBP—1,5%—L2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	25	-	-	-
1	Maturação do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	4,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	8,5	-	-	-
	Peso _g	10,4	-	-	-
GBP—1,5%—L3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maturação do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	8,0	-	-	-
	Circunferência _{cm}	12,5	-	-	-
	Peso _g	30,9	-	-	-

LEGENDA: GBP—1,5%—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L na concentração (V/V) de 1,5%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 26 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto L com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—L): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—3,0%—L1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	23	-	-	-
1	Maduração do fruto	132	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	10,9	-	-	-
	Circunferência _{cm}	17,2	-	-	-
	Peso _g	59,3	-	-	-
GBP—3,0%—L2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	25	-	-
2	Maduração do fruto	151	151	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	9,5	6,5	-	-
	Circunferência _{cm}	15,0	11,5	-	-
	Peso _g	48,6	31,1	-	-
GBP—3,0%—L3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	25	-	-	-
1	Maduração do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	7,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	15,0	-	-	-
	Peso _g	49,1	-	-	-

LEGENDA: GBP—3,0%—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L na concentração (V/V) de 3,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 27 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto L com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—L): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—6,0%—L2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	18	22	-	-
2	Maturação do fruto	97	109	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	15,0	8,4	-	-
	Circunferência _{cm}	26,5	13,7	-	-
	Peso _g	190,2	32,5	-	-
GBP—6,0%—L3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	13	20	-	-
2	Maturação do fruto	97	132	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	15,5	10,8	-	-
	Circunferência _{cm}	19,2	17,6	-	-
	Peso _g	137,7	67,6	-	-

LEGENDA: GBP—6,0%—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L na concentração (V/V) de 6,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 28 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto A com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—A): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—1,5%—A1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maduração do fruto	132	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	11,8	-	-	-
	Circunferência _{cm}	16,6	-	-	-
	Peso _g	57,5	-	-	-
GBP—1,5%—A2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	25	-	-	-
1	Maduração do fruto	132	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	6,3	-	-	-
	Circunferência _{cm}	13,1	-	-	-
	Peso _g	28,6	-	-	-
GBP—1,5%—A3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	-	-	-
1	Maduração do fruto	132	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	6,0	-	-	-
	Circunferência _{cm}	10,3	-	-	-
	Peso _g	24,8	-	-	-

LEGENDA: GBP—1,5%—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A na concentração (V/V) de 1,5%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 29 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto A com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—A): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—3,0%—A1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	22	-	-
2	Maturação do fruto	109	132	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	13,5	12,2	-	-
	Circunferência _{cm}	7,5	17,9	-	-
	Peso _g	108,3	79,3	-	-
GBP—3,0%—A2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	25	27	-	-
2	Maturação do fruto	109	109	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
2	Tamanho _{cm}	12,7	9,0	-	-
	Circunferência _{cm}	14,5	13,7	-	-
	Peso _g	80,5	45,9	-	-
GBP—3,0%—A3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	18	27	-	-
2	Maturação do fruto	97	132	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	13,0	10,0	-	-
	Circunferência _{cm}	17,0	16,4	-	-
	Peso _g	133,9	59,4	-	-

LEGENDA: GBP—3,0%—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A na concentração (V/V) de 3,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 30 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto A com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—A): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—6,0%—A1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	22	24	25	-
3	Maturação do fruto	97	132	132	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	13,5	13,5	12,4	-
	Circunferência _{cm}	19,8	21,3	20,3	-
	Peso _g	143,5	131,2	127,9	-
GBP—6,0%—A2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	18	-	-	-
1	Maturação do fruto	97	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	12,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	18,0	-	-	-
	Peso _g	112,3	-	-	-
GBP—6,0%—A3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	15	20	-	-
2	Maturação do fruto	132	132	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	11,4	11,5	-	-
	Circunferência _{cm}	19,6	19,7	-	-
	Peso _g	75,5	89,2	-	-

LEGENDA: GBP—6,0%—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A na concentração (V/V) de 6,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 31 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto AL com dosagem de 1,5% em LAd (amostra GBP—1,5%—AL): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—1,5%—AL1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	35	-	-	-
1	Maturação do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	5,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	14,5	-	-	-
	Peso _g	26,5	-	-	-
GBP—1,5%—AL2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	18	-	-	-
1	Maturação do fruto	151	-	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	6,5	-	-	-
	Circunferência _{cm}	11,5	-	-	-
	Peso _g	23,1	-	-	-

LEGENDA: GBP—1,5%—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL na concentração (V/V) de 1,5%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 32 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto AL com dosagem de 3,0% em LAd (amostra GBP—3,0%—AL): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—3,0%—AL1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	23	-	-
2	Maturação do fruto	109	109	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	12,9	13,2	-	-
	Circunferência _{cm}	14,5	23,8	-	-
	Peso _g	123,3	130,4	-	-
GBP—3,0%—AL2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	22	22	30	-
3	Maturação do fruto	109	109	132	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	10,5	11,5	10,7	-
	Circunferência _{cm}	18,0	15,9	16,5	-
	Peso _g	93,9	74,2	71,5	-
GBP—3,0%—AL3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	25	30	-
3	Maturação do fruto	132	132	132	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	11,2	9,5	10,1	-
	Circunferência _{cm}	16,1	14,9	17,5	-
	Peso _g	79,8	45,2	75,7	-

LEGENDA: GBP—3,0%—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL na concentração (V/V) de 3,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 33 — III. Monitoramento dos frutos de pimentão verde e vermelho (maduros) cultivados com o vermicomposto AL com dosagem de 6,0% em LAd (amostra GBP—6,0%—AL): dias para o início da floração, formação final dos frutos e, também, características dos frutos (tamanho, circunferência e peso).

		F1	F2	F3	F4
GBP—6,0%—AL1	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	15	20	23	-
3	Maturação do fruto	97	109	109	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	13,5	10,0	7,0	-
	Circunferência _{cm}	23,0	24,0	15,0	-
	Peso _g	163,0	148,7	43,1	-
GBP—6,0%—AL2	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	15	20	25	-
3	Maturação do fruto	109	109	109	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
1	Tamanho _{cm}	10,9	11,2	6,3	-
	Circunferência _{cm}	19,0	20,1	11,7	-
	Peso _g	91,9	99,0	23,7	-
GBP—6,0%—AL3	Número de dias até:				
Frutos formados:	Início da formação do fruto	20	23	-	-
2	Maturação do fruto	109	109	-	-
Frutos com anomalia:	Características do fruto:				
0	Tamanho _{cm}	13,0	12,3	-	-
	Circunferência _{cm}	20,0	19,0	-	-
	Peso _g	120,5	116,6	-	-

LEGENDA: GBP—6,0%—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL na concentração (V/V) de 6,0%. F1-F4 Referem-se aos frutos de pimentão obtidos em ordem crescente de produção.

Tabela 34 — III. RESUMO — Dados de produção de pimentão vermelho em diferentes substratos.

	Número médio de frutos <small>frutos planta⁻¹</small>	Tempo médio para formação <small>dias</small>	Dados médios dos frutos		
			Tamanho <small>cm</small>	Circunferência <small>cm</small>	Peso <small>g</small>
GBP—LAd	0 ± 0	-	-	-	-
GBP—NPK	1abc ± 0	94a ± 26	11,3bcd ± 1,3	19,1cde ± 1,2	96,8bcd ± 9,9
GBP—1,5%—STD	1abc ± 0	121bcde ± 14	10,7bcd ± 3,4	13,3abc ± 2,9	46,7abc ± 40,3
GBP—3,0%—STD	1bc ± 1	105abcd ± 20	11,9cd ± 3,2	17,0abcd ± 2,8	93,0bcd ± 42,8
GBP—6,0%—STD	1bc ± 1	87a ± 13	10,9bcd ± 1,7	18,8bcde ± 2,1	134,5d ± 38,6
GBP—1,5%—L	1abc ± 0	126e ± 5	6,2a ± 1,8	11,2a ± 2,3	23,1a ± 11,1
GBP—3,0%—L	1bc ± 1	123de ± 10	8,6abc ± 2,0	14,7abcd ± 2,4	47,0abc ± 11,7
GBP—6,0%—L	1bc ± 1	91ab ± 15	12,4d ± 3,4	23,0e ± 8,2	107,0cd ± 70,6
GBP—1,5%—A	1abc ± 0	110bcde ± 3	8,0ab ± 3,3	13,3abc ± 3,2	37,0ab ± 17,9
GBP—3,0%—A	2cd ± 0	92ab ± 13	11,7bcd ± 1,8	14,5abcd ± 3,8	84,6bcd ± 32,2
GBP—6,0%—A	2cd ± 1	100abc ± 18	12,5d ± 0,9	19,8de ± 1,1	113,3d ± 26,3
GBP—1,5%—AL	1ab ± 1	120cde ± 5	6,0a ± 0,7	13,0ab ± 2,1	24,8a ± 2,4
GBP—3,0%—AL	3d ± 1	97ab ± 10	11,2bcd ± 1,3	17,2bcd ± 2,9	86,7bcd ± 28,1
GBP—6,0%—AL	3d ± 1	87a ± 4	10,5bcd ± 2,7	19,0bcde ± 4,0	100,8cd ± 48,0

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK; GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD; GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L; GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A; GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto STD—AL. 1,5% 3,0% 6,0% é a concentração (V/V) de vermicomposto utilizada no cultivo de pimentão.

4.4. Dinâmica e transporte do Cr

A princípio, o estudo da dinâmica do Cr se deu por meio da transferência dos íons Cr (III) e Cr (VI) do solo à planta e seu transporte ao longo dos órgãos e tecidos vegetais. Conforme esperado, tanto no solo como nas plantas, não foram detectados nem determinados quaisquer teores de Cr (VI). Desde o Capítulo I já era sabido que a vermicompostagem foi eficiente ao bioconverter as pequenas quantidades destes íons em Cr (III), que é nutriente para as plantas.

Neste estudo, a primeira etapa se deu na investigação dos teores de Cr (III) no substrato, antes do cultivo e no pós-colheita, ao final dos experimentos (Tabela 35 — III). A priori, acredita-se que a diferença entre os teores de Cr esteja relacionada à transferência destas espécies à planta por meio da absorção radicular. Nas amostras em que o Cr (III) foi determinado acima do limite de quantificação (LOQ), observou-se uma diminuição na concentração deste íon no substrato, entre o início do cultivo e o pós-colheita, resultando em valores negativos de ΔCr (III).

As maiores variações foram observadas nas amostras GBP—6,0%—AL ($353,57 \mu\text{g kg}^{-1}$) > GBP—1,5%—AL ($344,73 \mu\text{g kg}^{-1}$) > GBP—3,0%—A ($343,28 \mu\text{g kg}^{-1}$), com valores estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$). Por outro lado, as amostras que com menor ΔCr (III) foram GBP—1,5%—L ($254,94 \mu\text{g kg}^{-1}$) < GBP—3,0%—L ($284,72 \mu\text{g kg}^{-1}$) < GBP—6,0%—L ($293,13 \mu\text{g kg}^{-1}$), com valores estatisticamente diferentes (One-way ANOVA, $P < 0,05$).

Tabela 35 — III. Determinação dos teores de Cr (III) nos diferentes substratos utilizados para o cultivo de pimentão, antes das plantas serem transplantadas e após a colheita dos frutos, assim como a diferença destes teores em função do tempo, ΔCr (III) (média $\pm$ DP, $n = 3$, cálculos com base em peso seco).

	Cr (III) antes do plantio $\mu\text{g kg}^{-1}$	Cr (III) na pós-colheita $\mu\text{g kg}^{-1}$	$ \Delta\text{Cr (III)} \mu\text{g kg}^{-1}$
GBP—1,5%—L	428,96a $\pm$ 18,12	174,02a $\pm$ 15,30	254,94a $\pm$ 30,60
GBP—3,0%—L	480,01b $\pm$ 18,48	195,29ab $\pm$ 24,39	284,72b $\pm$ 30,60
GBP—6,0%—L	510,08c $\pm$ 18,48	216,95bc $\pm$ 13,49	293,13bc $\pm$ 22,88
GBP—1,5%—A	529,48cd $\pm$ 30,30	215,37bc $\pm$ 42,34	314,11de $\pm$ 52,07
GBP—3,0%—A	560,71de $\pm$ 31,79	217,43abc $\pm$ 56,97	343,28e $\pm$ 65,24
GBP—6,0%—A	531,55cd $\pm$ 31,19	219,69bc $\pm$ 36,46	311,86d $\pm$ 47,98
GBP—1,5%—AL	561,38e3 $\pm$ 31,01	216,65bc $\pm$ 32,22	344,73e $\pm$ 44,72
GBP—3,0%—AL	530,37bcd $\pm$ 53,82	217,68bc $\pm$ 10,28	312,69d $\pm$ 54,79
GBP—6,0%—AL	571,40e $\pm$ 36,27	217,83bc $\pm$ 31,13	353,57ef $\pm$ 47,80

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L; GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A; GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto STD—AL. 1,5% 3,0% 6,0% é a concentração (V/V) de vermicomposto utilizada no cultivo de pimentão. $|\Delta\text{Cr (III)}|$ é o módulo da diferença entre a concentração de Cr (III) determinada no substrato antes do cultivo e no pós-colheita.

A princípio, o Cr (III) não possui mobilidade para deixar o sistema substrato-planta, para além do vaso de plantio. Uma vez que certa alíquota de Cr (III) deixou de ser determinada no substrato, após o plantio, possivelmente a quantidade remanescente foi transferida para a planta. Absorvidos pelo sistema radicular, os íons de Cr (III) podem ser transportados para os tecidos do caule, das folhas ou frutos, além da possibilidade de permanecerem retidos na raiz.

A princípio, as amostras GBP—LAd, GBP—NPK, GBP—STD em todas as concentrações, e GBP—1,5%—L apresentaram raízes com teores de Cr (III) abaixo do LOQ (Tabela 36 — III), indicando que a absorção foi seguida pelo transporte, sem acúmulo no sistema radicular.

Em geral, a concentração de Cr (III) variou em frutos > caule e talos > folhas = raiz, com exceções. Frutos e caule e talos apresentaram valores mais elevados de Cr (III), provavelmente devido à capacidade de acumular metais em suas células e tecidos vegetais.

Nos frutos, a concentração variou entre 145,06-165,20 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Pimentões colhidos nas amostras GBP—NPK e GBP—STD, em todas as concentrações, apresentaram teores de Cr (III) estatisticamente diferente das demais. Já as amostras que receberam resíduos de curtume em seus substratos (GBP—VRC) apresentaram teores de Cr (III) estatisticamente iguais (One-way ANOVA, $P < 0,05$).

Nas folhas, as concentrações determinadas de Cr (III) foram estatisticamente iguais em todas as amostras, $\sim 41 \mu\text{g kg}^{-1}$. Já nos caules e talos, as amostras GBP—LAd, GBP—NPK, GBP—STD em todas as concentrações e a amostra GBP—1,5%—L apresentaram teores de Cr (III) estatisticamente iguais, variando entre 60,71-64,50 $\mu\text{g kg}^{-1}$; nas demais amostras (GBP—3,0%—L, GBP—6,0%—L e GBP—AL, em todas as concentrações) os teores de Cr (III) também foram estatisticamente iguais, acima das demais, 82,19-92,44 $\mu\text{g kg}^{-1}$.

Por último, os teores de Cr (III) determinados nas raízes variaram entre as amostras, sem seguir uma tendência, com valores variando entre 23,86-65,12 $\mu\text{g kg}^{-1}$.

Tabela 36 — III. Determinação dos teores de Cr (III) nas plantas de pimentão, em diferentes partes: raiz, caule e talos, folhas e frutos (média $\pm$ DP, $n = 3$, cálculos com base em peso seco).

	Raiz $\mu\text{g kg}^{-1}$	Caule e talos $\mu\text{g kg}^{-1}$	Folhas $\mu\text{g kg}^{-1}$	Frutos $\mu\text{g kg}^{-1}$
GBP—LAd	< LOQ	60,71a $\pm$ 8,36	41,65a $\pm$ 4,01	-
GBP—NPK	< LOQ	61,69a $\pm$ 2,70	41,93a $\pm$ 2,19	145,06a $\pm$ 8,26
GBP—1,5%—STD	< LOQ	61,77a $\pm$ 5,31	41,64a $\pm$ 4,01	145,40ab $\pm$ 27,32
GBP—3,0%—STD	< LOQ	62,81a $\pm$ 4,08	41,60a $\pm$ 5,54	156,49ab $\pm$ 12,34
GBP—6,0%—STD	< LOQ	64,50a $\pm$ 6,63	41,57a $\pm$ 5,30	159,24ab $\pm$ 11,73
GBP—1,5%—L	< LOQ	61,74a $\pm$ 4,23	41,85a $\pm$ 4,18	165,12bc $\pm$ 11,24
GBP—3,0%—L	44,56cd $\pm$ 17,18	82,23b $\pm$ 4,32	41,74a $\pm$ 3,96	165,20bc $\pm$ 12,95
GBP—6,0%—L	33,61bc $\pm$ 18,61	82,29b $\pm$ 6,92	41,64a $\pm$ 4,05	164,83bc $\pm$ 9,44
GBP—1,5%—A	< LOQ	82,19b $\pm$ 5,62	41,53a $\pm$ 7,08	165,22bc $\pm$ 15,16
GBP—3,0%—A	44,18cd $\pm$ 32,18	92,44c $\pm$ 3,53	41,53a $\pm$ 5,23	165,12bc $\pm$ 13,19
GBP—6,0%—A	24,99a $\pm$ 3,94	82,28bc $\pm$ 9,44	41,69a $\pm$ 5,95	164,90bc $\pm$ 17,27
GBP—1,5%—AL	56,01bcd $\pm$ 31,22	82,27b $\pm$ 5,19	41,58a $\pm$ 4,15	164,88bc $\pm$ 10,07
GBP—3,0%—AL	23,86ab $\pm$ 13,88	82,19b $\pm$ 7,19	41,60a $\pm$ 4,36	165,03bc $\pm$ 13,73
GBP—6,0%—AL	65,12e $\pm$ 3,31	83,20bc $\pm$ 9,97	41,56a $\pm$ 4,86	164,69bc $\pm$ 15,02

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.

LEGENDA: GBP—LAd Plantas cultivadas em latossolo amarelo distrófico; GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK; GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD; GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L; GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A; GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto STD—AL. 1,5% 3,0% 6,0% é a concentração (V/V) de vermicomposto utilizada no cultivo de pimentão.

5. DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do solo e avaliação do potencial nutritivo dos substratos

A princípio, as análises de caracterização do solo tiveram como objetivo verificar se o material coletado era, de fato, um LAd. De acordo com a EMBRAPA, para que um solo seja considerado distrófico, seu V% deve ser menor que 50%, conforme observado na amostra de solo analisada. Já sua coloração é devida ao seu processo de formação, que tem origem em materiais parentais argilosos ou arenoargilosos sedimentares (EMBRAPA, 2006b).

Pobre em MO e com baixa CTC, o LAd utilizado permitiu avaliar o potencial nutritivo dos vermicompostos. Um solo rico em MO dificultaria a visibilidade dos resultados quando aplicados os vermicompostos, uma vez que não seria possível saber qual MO estaria atuando na nutrição vegetal das plantas. Incorporar MO ao solo implica também, além de elevar seus teores de COT, melhorar sua CTC e V%, atributos fundamentais para qualidade do solo de uso agrícola (Tobiašová, 2011; Canellas e Santos, 2005; Ndegwa et al., 2000).

Além da MO e da CTC, outro atributo importante é a acidez do solo. Solos com baixa acidez inviabilizam as práticas agrícolas ao comprometer o fluxo e a troca de nutrientes, interferindo no crescimento e desenvolvimento das plantas (Tan, 1998; Tisdale et al., 1990). O solo utilizado nos experimentos apresentou uma alta acidez, típico dos latossolos brasileiros. Sabe-se que ao incorporar a MO ao solo (vermicompostos) o pH tende a se elevar, diminuindo a mobilidade dos nutrientes e sua absorção pelo sistema radicular das plantas (Tobiašová, 2011; Canellas e Santos, 2005; Ndegwa et al., 2000; Tan, 1998; Tisdale et al., 1990).

Os nutrientes, por sua vez, também apresentaram valores baixos, de macro e micronutrientes, típicos de um LAd. Estes teores influenciaram a soma das bases trocáveis (B) e consequentemente a CTC e a V%, que são parâmetros matematicamente lineares (ISO 11260, 1994).

Ao comparar o LAd caracterizado neste estudo com os dados obtidos em outros trabalhos, os resultados reportados são semelhantes aos determinados por Oliveira et al. (2001) e Lima et al. (2009), por exemplo:

<i>i.</i> Oliveira et al. (2001) ⁴	<i>ii.</i> Lima et al. (2009) ⁵
pH 4,1	pH 4,57
TOC 1,21%	CTC 6,94 cmol _c kg ⁻¹
CTC 83,30 cmol _c kg ⁻¹	A 6,89 cmol _c kg ⁻¹
A 75,01 cmol _c kg ⁻¹	B 0,05 cmol _c kg ⁻¹
B 21,45 cmol _c kg ⁻¹	V% 0,72
V% 27,70	P 188 mg kg ⁻¹
P 3,95 mg kg ⁻¹	K 0,03 cmol _c kg ⁻¹
K 0,39 cmol _c kg ⁻¹	Ca 0,01 cmol _c kg ⁻¹
Ca 14,48 cmol _c kg ⁻¹	Mg 0,01 mmol _c kg ⁻¹
Mg 6,58 cmol _c kg ⁻¹	Mn 0,00 g kg ⁻¹
Fe 71,5 g kg ⁻¹	Zn 0,00 g kg ⁻¹
	Fe 65 ,00 g kg ⁻¹

⁴ Alguns valores foram calculados a partir dos dados divulgados pelos autores, corrigidos pela densidade do solo ($d = 1316 \text{ kg m}^{-3}$) a fim de padronizar as unidades utilizadas em ambos os estudos. A MO e alguns nutrientes não foram determinados neste estudo: Mo, N, B, Cu, Mn e Zn.

⁵ Os valores de A, B, CTC e V% foram calculados a partir dos dados apresentados pelos autores. A MO, o TOC, e alguns nutrientes não foram determinados neste estudo.

Esses dados — além de outros encontrados na literatura (Coelho et al., 2007; Canellas e Santos, 2005; Ribeiro et al., 2000; Ker, 1998) — apresentaram resultados diferentes aos observados neste estudo. Conforme esperado, solos de regiões diferentes apresentam atributos químicos e físicos diversos, apesar de estarem em concordância com os critérios de classificação de um latossolo (EMBRAPA, 2006b). Variações foram observadas, por exemplo, na CTC: 64,91 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ contra 83,30 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em Oliveira et al. (2001) e 6,94 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em Lima et al. (2009); e V%: 27,99% contra 27,70% em Oliveira et al. (2001) — valor bastante próximo — e 0,72% em Lima et al. (2009), uma diferença discrepante; além dos nutrientes, que variaram aleatoriamente. Em geral, em estudos de práticas agrícolas convencionais, os teores de MO e TOC se quer são mencionados ou levados em consideração.

Diversos estudos sobre o plantio de pimentão em diferentes sistemas e condições são encontrados na literatura, porém são poucos os estudos que utilizaram o mesmo solo cultivado neste estudo. A escolha do LAd também foi devida ao fato de que esse solo é típico da região Central Paulista, onde se encontra São Carlos (SP), cidade sede deste estudo.

Assim, considera-se que a escolha do LAd para o plantio de pimentão foi coesa, pois permitiu verificar o efeito da adição dos vermicompostos no crescimento e desenvolvimento das plantas de pimentão. Apesar das análises químicas terem sido importantes, uma simples análise visual permitia diferenciar, com clareza, quais culturas receberam ou não os vermicompostos.

5.2. Monitoramento do cultivo de pimentão verde

Em uma análise ampla que contemple todos os resultados obtidos no cultivo de pimentão, foi evidente o quão benéfico foi a aplicação de vermicomposto ao solo, para produção dessa hortaliça. Além disso, podemos afirmar que:

- i. Plantas cultivadas em substratos contendo quaisquer vermicompostos (amostras GBP—VRC) desenvolveram e produziram mais que as plantas cultivadas diretamente no LAd (amostra controle, GBP—LAd). Logo, o manejo adequado do solo com a aplicação desse insumo agrícola é benéfico, além de evidenciar a inviabilidade do plantio de pimentão em um LAd bruto, sem manejo algum.
- ii. Plantas cultivadas em substratos contendo quaisquer vermicompostos (amostras GBP—VRC) desenvolveram e produziram mais que as plantas cultivadas com aplicação de fertilizante mineral NPK (amostra referência, GBP—NPK). Embora tenha produzido frutos, a amostra GBP—NPK desenvolveu menos que as demais, principalmente se comparada às plantas que receberam as dosagens de 3,0% e 6,0% de qualquer vermicomposto.
- ii. Plantas cultivadas com adição dos vermicompostos VRC—L, VRC—A ou VRC—AL desenvolveram e produziram mais na comparação com as plantas que receberam o vermicomposto VRC—STD. Embora tenham produzido frutos, a razão entre os frutos com anomalias e frutos bem formados foi de 1:1, muito inferior aos demais tratamentos, além de apresentar plantas pouco desenvolvidas. Assim, pode-se afirmar que a adição de resíduos de curtume à vermicompostagem produziu insumos benéficos para as plantas, apresentando bons resultados no desenvolvimento e produção de frutos.
- iii. Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—AL apresentaram resultados semelhantes as plantas que receberam o vermicomposto VRC—A, tanto para o desenvolvimento quanto para a produção de frutos.
- iv. Plantas cultivadas com adição de vermicomposto VRC—L apresentaram resultados estatisticamente diferente das plantas que receberam os vermicompostos VRC—A e VRC—AL. Logo, considera-se que o efeito benéfico está relacionado a presença das aparas curtidas, uma vez que a presença do lodo não foi bioestimulante para as plantas. Contudo, o lodo não apresentou malefício algum, o que permite que ambos os resíduos possam ser beneficiados juntos, conforme processado para a obtenção do vermicomposto VRC—AL.
- v. Apesar do lodo da estação de tratamento de efluentes poder ser processado junto as aparas para a produção de

vermicompostos, outras práticas de valorização da MO deste resíduo — preparo de um outro novo material — seria mais viável, considerando que o manejo adequado de um resíduo deva garantir ganhos reais no âmbito ambiental e socioeconômico, e não um mero processamento conjunto, conforme realizado na obtenção do vermicomposto VRC—AL. Contudo, por não apresentar malefícios, o processamento conjunto é uma opção e pode ser considerada viável após uma análise crítica de uma situação real.

- vi. Por último, embora a dose agronômica recomendada tenha sido 3,0% de vermicomposto, as plantas que receberam o dobro dessa dosagem (6,0%) apresentaram resultados superiores, indicando que esta concentração é a mais adequada. Em estudos futuros, outras concentrações poderiam ser testadas, tomando a concentração de 6,0% como sendo a dosagem agronômica recomendada ou de referência.

Embora a discussão desses resultados pareça conclusiva, é importante saber a quais razões se pressupõem tais diferenças entre as amostras estudadas. A priori, a análise elementar dos nutrientes dos vermicompostos já justifica parte desses resultados. A diferença nos teores de macronutrientes foi pequena entre os vermicompostos, ao passo que nos teores de micronutrientes esta diferença é maior.

Por ser um material de origem biológica — além de ter sido submetido a um processo biológico avançado — é difícil estabelecer um paralelo entre os constituintes químicos, físicos e biológicos de vermicompostos utilizados em outros estudos, os quais foram preparados em condições diferentes das utilizadas nesse estudo. Mesmo assim, outros estudos utilizaram vermicompostos com composições química e nutricional distintas e, mesmo assim, apresentaram resultados satisfatórios (Nunes et al., 2016; Kenyangi e Blok, 2013; Vig et al., 2011; Kaur et al., 2010; Bachman e Metzger, 2008).

Os nutrientes influenciaram diretamente o crescimento das plantas, tal qual seu desenvolvimento e produção de frutos. Além disso, a avaliação visual das plantas — com base principalmente na coloração, forma e textura das folhas — pode fornecer informações importantes acerca do estado nutricional das plantas (Taiz e Zeiger, 2013; Epstein e Bloom, 2006; Fontes, 2006; Faquin, 2005; Epstein, 1997; Malavolta, 1980)..

A começar pela coloração verde intensa das folhas nas amostras GBP—NPK, que pode estar relacionada à deficiência de Cu (micronutriente) ou de P (macronutriente). Uma vez que essas amostras receberam um fertilizante rico em P, provavelmente essa deficiência deveu-se à falta de Cu. Além disso, não é possível determinar um verde limiar, entre a quantidade ideal e os tons que definem o excesso ou escassez de um determinado nutriente. Já a coloração verde-amarelada, observada nas folhas de algumas plantas ao final dos experimentos, pode estar relacionada a deficiência de N, Ca e S (macronutriente) ou Fe e Mn (micronutriente). Conforme já citado, a insuficiência destes nutrientes afeta o crescimento das plantas, ao passo que as folhas mais velhas adquirem esta coloração, desbotada. Além disso, plantas que não desenvolveram em tamanho também deram origem a menos folhas, as quais possuíam tamanho significativamente menor que as demais, além de não produzir frutos, conforme o esperado. Plantas que se desenvolveram no número de folhas e frutos mas que não cresceram, podem ter apresentado uma deficiência nos seus teores de Mg, N ou Mo. Todos estes fatos estão relacionados a deficiência nutricional, que afeta a planta em um todo, uma vez que todas as funções vitais dos organismos vegetais estão interligadas por meio de uma complexa rede de processos metabólicos e fisiológicos que interagem entre si (Taiz e Zeiger, 2013; Epstein e Bloom, 2006; Fontes, 2006; Faquin, 2005; Epstein, 1997; Malavolta, 1980).

Diversos estudos comprovam o efeito dos nutrientes no crescimento, desenvolvimento e produção de frutos em plantas de pimentão:

- i. Marti e Mills (1991) demonstraram o efeito da absorção do Ca pelas raízes e seu efeito no crescimento e desenvolvimento das plantas em função do teor de N no solo;
 - ii. Albuquerque et al. (2011) estudaram os efeitos da concentração de K na produção de pimentões, assim como nos dados biométricos dos frutos;
 - iii. Riga e Anza (2003) avaliaram os efeitos da deficiência de Mg na fisiologia das plantas de pimentão;
-

- iv. Aguilera-Gomez et al. (1999) avaliaram os efeitos do P no desenvolvimento das culturas de pimentão; entre outros estudos.

Ao todo, fica claro que os vermicompostos — ou outro fertilizante orgânico — podem apresentar quantidades mínimas de nutrientes, os quais nutrem suficientemente as plantas, permitindo que os organismos vegetais desenvolvam suas funções vitais e completem seus ciclos de vida e dos nutrientes envolvidos em seus processos fisiológicos e metabólicos (Albuquerque et al., 2011; Faquin, 2005; Riga e Anza, 2003; Aguilera-Gomez et al., 1999; Marti e Mills, 1991; Malavolta, 1980).

Dados relacionados ao crescimento — altura das plantas — não foram comparados por não haver estudos reportando este parâmetro em condições próximas às experimentadas nesse trabalho.

Quanto a formação dos frutos, a produção de pimentão (frutos planta⁻¹), tempos médios de floração, formação do fruto e maturação, além dos dados biométricos dos frutos (tamanho e circunferência) e peso, foram proporcionais a concentração de vermicomposto. Uma vez que as amostras GBR—L, GBP—A e GBP—AL produziram mais que a amostra GBP—STD, considera-se que os resíduos de curtume contribuíram para elevar a produção, provavelmente, em função dos nutrientes presentes em suas composições.

As anomalias observadas em alguns frutos, principalmente nas amostras que receberam 1,5% de vermicomposto, provavelmente se deram em função da deficiência nutritiva dos substratos, os quais receberam menor quantidade de MO.

Além disso, no Capítulo II foram apresentadas diversas moléculas responsáveis pela ação hormono-similar dos vermicompostos. Sabe-se que alguns hormônios atuam efetivamente nos processos fisiológicos que levam à floração, formação e maturação dos frutos, por exemplo (Taiz e Zeiger, 2013; Kerbauy, 2004):

- i. **Floração:** Nesta etapa, a giberelina é o hormônio que estimula a formação e o desenvolvimento das flores, ou seja, dos órgãos reprodutivos da planta;
- ii. **Formação dos frutos:** É estimulada pelas auxinas e giberelinas. Esses hormônios agem de forma associada, a auxina estimula o desenvolvimento dos ovários das flores e a giberelina auxilia na estocagem de açúcares; e
- iii. **Maturação dos frutos:** Esta etapa é estimulada pelo etileno, produzido por folhas, frutos e flores durante o processo de envelhecimento dos organismos vegetais.

Apesar de que apenas o efeito auxino-similar tenha sido determinado no Capítulo II, espera-se que outras moléculas também apresentem efeitos similares ao do etileno e das giberelinas. Além disso, amostras que tiveram maior efeito auxino-similar também apresentaram maior número de frutos (GBP—A e GBP—AL).

Ao analisarmos os resultados obtidos do Capítulo I ao Capítulo III, é possível notar o quão influente um dado é sobre os outros, se completando e corroborando para um entendimento mais amplo sobre o efeito do uso de vermicompostos no cultivo de pimentão.

Ribeiro et al. (2000) estudaram o uso de vermicompostos como alternativa para a produção orgânica de pimentão em ambiente protegido. Além disso, os autores compararam seus resultados com experimentos utilizando um argissolo vermelho eutrófico (PVe)⁶ e, também, sob aplicação de NPK, mimetizando um plantio convencional. O PVe utilizado apresentava 4,26% de MO, pH 6 e os nutrientes: Ca 3,10 cmol_c kg⁻¹, Mg 1,30 cmol_c kg⁻¹, P 8,00 mg kg⁻¹ e K 0,75 cmol_c kg⁻¹. Já o vermicomposto foi preparado a partir de esterco bovino e apresentou 18,00% de MO, N 1,72%, Ca 2,65%, Mg 0,34%, P 1,30% e K 0,85%. O NPK utilizado continha a proporção 2:7:4. Embora seu estudo apresente estrutura e design semelhante a esse, a escolha do solo e do fertilizante NPK foram diferentes. A começar pelo solo, um PVe poderia mascarar os resultados

⁶ O autor classificou o solo utilizado em seu estudo como sendo um odzólico vermelho escuro, porém esta classificação está defasada. Com base na classificação atual, o solo utilizado é um argissolo vermelho eutrófico (PVe) (EMBRAPA, 2006b).

e influenciar no desenvolvimento dos pimentões, uma vez que o solo apresenta certo potencial nutritivo, diferente do LAd, que não é o recomendado, devido às suas deficiências. Já o NPK utilizado pelo autor apresenta uma proporção diferente dos nutrientes, 2:7:4 contra 12:5:14. Mesmo assim, os resultados obtidos seguiram a mesma lógica observada neste estudo: plantas que receberam vermicompostos apresentaram resultados melhores que os observados no plantio com o NPK e, também, na amostra controle (PVe):

- i. Enquanto que no cultivo orgânico a produção foi de $16,0 \text{ t ha}^{-1}$, no plantio convencional foi apenas de $13,1 \text{ t ha}^{-1}$.
- ii. Já a amostra controle (PVe) apresentou produção abaixo do valor obtido no cultivo orgânico, com adição de vermicomposto, e acima do plantio convencional, $13,60 \text{ t ha}^{-1}$.⁷
- iii. Os pimentões orgânicos apresentaram pesos médios de 72,9 g, contra 67,8 g no convencional e 65,5 g em PVe

Comparando os resultados de ambos os estudos, os valores obtidos no cultivo orgânico por Ribeiro et al. (2000) são inferiores aos obtidos nesse estudo, por exemplo, no peso dos frutos quando aplicados 3,0 e 6,0% de vermicomposto (84,6-134,5 g). Mesmo no cultivo convencional, o peso dos pimentões manteve-se abaixo do obtido nesse estudo, 96,8 g. No que se refere às dimensões dos frutos, os pimentões orgânicos também apresentaram dimensões maiores, 9,3 cm de circunferência, contra 9,0 e 8,9 cm nos plantios convencionais em PVe, respectivamente. Mesmo que, aparentemente, os resultados obtidos em nosso estudo tenham sido superiores, o uso de um argissolo dificultou a comparação real entre a eficácia dos vermicompostos, uma vez que o PVe possui muito mais nutrientes e MO que um LAd. Contudo, ambos os estudos demonstram a viabilidade do uso de vermicompostos como insumo para a agricultura orgânica.

Em geral, a variedade de solos no Brasil e a disponibilidade de resíduos agrícolas levaram a produção e divulgação científica de diferentes trabalhos de cunho e objetivos diversos, o que dificulta a comparação de resultados entre trabalhos. Contudo, em todos os estudos reportados na literatura específica, quer seja na área de química ambiental ou de agronomia e ciências agrárias, voltadas para a agricultura orgânica, é possível encontrar trabalhos que concordam com a mesma tese defendida ao longo de nosso estudo, de que é possível utilizar resíduos orgânicos — devidamente caracterizados e criticamente selecionados — para o preparo de insumos para a agricultura orgânica, para aplicação no plantio de pimentão ou outra cultura de interesse econômico e social.

5.3. Dinâmica e transporte do cromo

O êxito obtido na aplicação de vermicompostos preparados a partir de resíduos de curtume no cultivo de pimentão foi mensurado com base, principalmente, na produção de frutos (fruto planta^{-1}) e em suas características (dimensões, peso, tempo de formação etc.).

Sabe-se que o objetivo principal do agricultor é, envolvendo a lógica mercantilista que rege as sociedades modernas, a obtenção de uma alta produtividade, que remete ao lucro. Contudo, em nosso estudo, para a obtenção de uma alta produtividade fez-se o uso de resíduos industriais ricos em Cr, que podem ser um problema em virtude da segurança alimentar, a qual deve ser garantida e estar acima do lucro.

Para isso, a dinâmica do Cr foi determinada. O transporte do Cr (III) do solo à planta foi investigado, tomando como base a mobilidade e a disposição de seus íons pelos tecidos e órgãos vegetais, em especial, dos frutos de pimentão. Essa mobilidade varia em função das características químicas, físicas e biológicas do meio, e é a responsável pelo transporte do íon retido nas partículas do meio para a planta.

Se tratando de sua dinâmica, o processo se inicia com a absorção dos íons de Cr (III) pela raiz, passando pelos

⁷ Devido a falta de informações úteis para a conversão das unidades, de fruto planta^{-1} (unidade típica para cultivo em vasos ou ambiente protegido) para t ha^{-1} (unidade típica para cultivo em campo), não foi possível comparar os resultados com os obtidos nesse trabalho.

tecidos do caule e talos, chegando até as folhas e frutos. Em cada uma dessas etapas pode ocorrer a acumulação do Cr. Porém, o órgão vegetal que desperta maior preocupação são os frutos, uma vez que envolve a segurança alimentar do consumidor final (Hua et al., 2012; Thor et al., 2011; Gropper et al., 2009).

A raiz atua como uma espécie de filtro e não permite que uma concentração excessiva de Cr possa ser assimilada pela planta, acumulando-o em seus tecidos (Hua et al., 2012; Thor et al., 2011; Gropper et al., 2009).

Apesar do Cr ser estudado há anos, foi a partir da década de 1990 que as pesquisas relacionadas às suas funções metabólicas deram notoriedade a esse mineral. Alguns estudos, por exemplo, relataram o papel do Cr no favorecimento da síntese das proteínas musculares e prevenção de doenças, como a diabetes tipo II, entre outras funções biológicas (Hua et al., 2012; Thor et al., 2011; Gropper et al., 2009).

Em 1989, o Comitê Americano para a Nutrição (Food Nutrition Board), do Departamento Americano de Agricultura (USDA, United States Department of Agriculture) estabeleceu a ingestão de 25,0 $\mu\text{g Cr dia}^{-1}$ para mulheres adultas (19-50 anos) e 35,0 $\mu\text{g Cr dia}^{-1}$ para os homens como a ideal, principalmente para evitar o aumento indesejado do teor de glicose no sangue (IOM, 1989).

Ao considerar que plantas que receberam 1,5%, 3,0 e 6,0% de vermicomposto produziram pimentões com $\sim 5,25$, 11,10 e 19,00 $\mu\text{g Cr}$ a cada 100 g de fruto,⁸ (Tabela 37 — III), avaliou-se que os teores de Cr não apresentam riscos para a saúde humana e a segurança alimentar.

A presença dos resíduos de curtume nos vermicompostos (amostras VRC—L, VRC—A e VRC—AL) não elevou os teores de Cr nos frutos, uma vez que os valores obtidos foram estatisticamente iguais às concentrações determinadas nos frutos que receberam o vermicomposto controle (VRC—STD), em uma mesma concentração (1,5%, 3,0% ou 6,0% V/V). Além disso, as concentrações de Cr determinadas nestas amostras são estatisticamente iguais à concentração média determinada nos frutos colhidos na amostra GBP—NPK (referência).

Tendo em vista os hábitos alimentares dos brasileiros e o consumo diário de pimentão — para os quais não existem dados oficiais de consumo — não foi possível realizar uma comparação direta com os valores recomendados pela USDA (entre 25-35 $\mu\text{g Cr dia}^{-1}$).

No entanto, ao compararmos o Cr (III) determinado nos pimentões com os valores reportados em outros alimentos, comumente denominados como ‘ricos em Cr’ ou ‘fonte de Cr’, nota-se que os pimentões produzidos em nosso estudo são ricos deste nutriente, podendo ser essenciais à alimentação humana, resultando em mais saúde e melhor qualidade de vida. Por exemplo, o brócolis apresenta, em média, 22,0 $\mu\text{g Cr } 100 \text{ g}^{-1}$. O pão integral e a batata apresentam 4,4 e 1,5 $\mu\text{g Cr } 100 \text{ g}^{-1}$, respectivamente. Nas uvas, vermelha e verde, a concentração de Cr é, em média, 6,5 e 2,1 $\mu\text{g Cr } 100 \text{ g}^{-1}$. Os pimentões apresentaram, em geral, concentrações variando de 3,8-21,4 $\mu\text{g Cr } 100 \text{ g}^{-1}$, que são valores próximos aos reportados (Tabela 37 — III) (NHI, 2012; Oliveira e Marchini, 2008; Vique et al., 1997).

⁸ A concentração de Cr em 100 g do fruto de pimentão foi calculada a partir da concentração de Cr nos frutos (Tabela 36 — III) e do peso do fruto fresco (Tabela 34 — III).

Tabela 37 — III. Comparação entre os teores de Cr (III) determinados frutos de pimentão e outros alimentos, conhecidos como fonte de Cr para a alimentação humana.

	Cr (III) $\mu\text{g Cr } 100 \text{ g}^{-1}$	Referência
Pimentão		
GBP—NPK	14,0bcd $\pm$ 1,2	-
GBP—1,5%—STD	6,7abc $\pm$ 4,8	-
GBP—3,0%—STD	14,5bcd $\pm$ 4,4	-
GBP—6,0%—STD	21,4d $\pm$ 4,0	-
GBP—1,5%—L	3,8a $\pm$ 1,5	-
GBP—3,0%—L	7,7abc $\pm$ 1,7	-
GBP—6,0%—L	17,6cd $\pm$ 7,1	-
GBP—1,5%—A	6,1ab $\pm$ 3,2	-
GBP—3,0%—A	13,9bcd $\pm$ 3,4	-
GBP—6,0%—A	18,6d $\pm$ 2,8	-
GBP—1,5%—AL	4,0a $\pm$ 1,1	-
GBP—3,0%—AL	14,3bcd $\pm$ 3,0	-
GBP—6,0%—AL	16,6cd $\pm$ 5,0	-
Brócolis	22,0	Oliveira e Marchini (2008)
Batata	1,5	NHI (2012)
Pão Integral	4,4	NHI (2012)
Uva verde	2,1	Vique et al. (1997)
Uva vermelha	6,5	Vique et al. (1997)
Maça	0,8	NHI (2012)
Laranja, suco	1,0	NHI (2012)
Alho	60,0	NHI (2012)

Valores na mesma coluna, seguidos pela mesma letra, são estatisticamente iguais em $P < 0,05$, de acordo com teste de Duncan e ANOVA One-Way.
 LEGENDA: GBP—NPK Plantas cultivadas com adição de fertilizante mineral NPK; GBP—STD Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—STD; GBP—L Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—L; GBP—A Plantas cultivadas com adição do vermicomposto VRC—A; GBP—AL Plantas cultivadas com adição do vermicomposto STD—AL. 1,5% 3,0% 6,0% é a concentração (V/V) de vermicomposto utilizada no cultivo de pimentão.

6. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO III

Os dados apresentados neste terceiro capítulo suportam as seguintes conclusões:

- i. O presente estudo confirma a expectativa de que os vermicompostos podem ser aplicados no cultivo orgânico do pimentão em ambiente protegido;
 - ii. A adição de vermicompostos aos substratos se mostrou bioestimulante às plantas, e influencia positivamente seu desenvolvimento, além de elevar a produção de frutos;
 - iii. Embora os frutos obtidos na amostra referência (GBP—NPK) tenham características estatisticamente iguais aos demais, sua produção se limita a 1 fruto planta⁻¹, enquanto que em outras amostras, são colhidos até 3 pimentões;
 - iv. Apesar do vermicomposto VRC—L não ter sido bioestimulante para as plantas, a presença do lodo de curtume vermicompostado não apresenta malefício algum para as plantas, o que permite seu processamento junto às aparas curtidas, conforme processados para a obtenção do vermicomposto VRC—AL;
 - v. Apesar da dose agronômica recomendada ter sido 3,0% de vermicomposto, plantas que receberam 6,0% apresentam resultados superiores, indicando que esta concentração é a mais adequada. Em estudos futuros, outras concentrações poderiam ser testadas, tomando a concentração de 6,0% como sendo a dosagem agronômica recomendada ou de referência;
 - vi. Ao investigar a dinâmica do Cr nas plantas de pimentão, apenas o Cr (III) foi detectado e quantificado, conforme o esperado. Absorvido pela raiz, a maior quantidade de Cr foi determinada nos frutos, porém abaixo do valor recomendado pela USDA para o consumo humano (25,0-35,0 µg Cr dia⁻¹);
 - vii. A adição de resíduos de curtume nos vermicompostos não influencia os teores de Cr quantificados nos frutos. A concentração de Cr (III) nos frutos colhidos nas amostras GBP—L, GBP—A e GBP—AL são estatisticamente iguais às concentrações determinadas nos frutos que receberam o vermicomposto controle (VRC—STD), em uma mesma concentração, 1,5%, 3,0% ou 6,0% V/V; e
 - viii. Os teores de Cr determinados nos frutos indicam que os pimentões colhidos estão aptos para o consumo, além de não apresentam riscos para a saúde humana e segurança alimentar.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA-GOMEZ, L.; DAVIES JR., F. T.; OLALDE-PORTUGAL, V.; DURAY, S. A.; PHAVAPHUTANON, L. Influence of Phosphorus and Endomycorrhiza (*Glomus Intraradices*) on gas exchange and plant growth of Chile Ancho Pepper (*Capsicum Annuum* L. cv. San Luis). **Photosynthetica**, v. 36, n. 3, p. 441–449, 1999.
- AKTAS, H.; KARNI, L.; CHANG, D.-C.; TURHAN, E.; BAR-TAL, A.; ALONI, B. The suppression of salinity-associated oxygen radicals production, in pepper (*Capsicum annuum*) fruit, by manganese, zinc and calcium in relation to its sensitivity to blossom-end rot. **Physiologia Plantarum**, v. 123, n. 1, p. 67–74, 2005.
- ALBUQUERQUE, F. DA S.; SILVA, Ê. F. DE F. E.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C. DE; NUNES, M. F. F. N. Growth and yield of sweet pepper fertigated under different irrigation depths and potassium doses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 686–694, 2011.
- ALMEIDA, J.; NAVARRO, Z. **Reconstruindo a agricultura: ideias e ideais na perspectiva do desenvolvimento rural sustentável**. Porto Alegre: UFRGS, 1997. 328 p.
- ALMEIDA, H. S.; SILVA, R. F.; GROLLI, A. L.; SCHEID, D. L. Use of agro-industrial waste in vermicompost meat in the seedlings production of *Capsicum annuum* L. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 3., 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Feira de Negócios, Tecnologia e Conhecimento em Meio Ambiente, 2012. p. 1-7.
- ALMEIDA, S. G.; PETERSEN, P.; CORDEIRO, A. **Crise socioambiental e conversão ecológica da agricultura brasileira: subsídios à formação de diretrizes ambientais para o desenvolvimento agrícola**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 2001. 121 p.
- ALTIERI, M. A. **Agroecology: the scientific basis of alternative agriculture**. Boulder: Westview Press, 1987. 227 p.
- ALVES, A. C. O.; SANTOS, A. L. S.; AZEVEDO, R. M. M. C. Organic agriculture in Brazil: a path to for the compulsory certification. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 2, p. 19–27, 2012.
- ANDRÉA, M. M. DE. Testes de toxicidade com organismos terrestres. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 680–683.
- ARAÚJO, J. S.; ANDRADE, A. P. DE; RAMALHO, C. I.; AZEVEDO, C. A. V. DE. Cultivo do pimentão em condições protegidas sob diferentes doses de nitrogênio via fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 559–565, 2009.
- BACHMAN, G. R.; METZGER, J. D. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 3155–3161, 2008.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. São Paulo: Bookman, 2011. 844 p.
- BARROS, J. D. S.; SILVA, M. F. P. Práticas agrícolas sustentáveis como alternativas ao modelo hegemônico de produção agrícola. **Sociedade e Desenvolvimento Rural**, v. 4, n. 2, p. 89–103, 2010.
-

- BECKMANN, M. Z.; RITA, G.; BURCK, D.; SCHUCK, P. V. A.; RUZZA, M.; MENDEZ, M. E. G. **Produtividade de tomateiro cultivado sob adubação orgânica em ambiente protegido**. Vitória da Conquista: Associação Brasileira de Horticultura, 2003. 5 p.
- BELTRÃO, N. E. M. **Agricultura orgânica e seu potencial como estratégia de produção**. 2015. Disponível em: <http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/trabalhos_cba4/412.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2015.
- BIANCHINI, V.; MEDAETS, J. P. P. **Da revolução verde à agroecologia: plano Brasil agroecológico**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2013. 21 p.
- BILLAUD, J. P. Agricultura sustentável nos países desenvolvidos: conceito aceito e incerto. **Agricultura Sustentável**, p. 25–44, 1995.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. Instrução Normativa nº 7 de 17 de maio de 1999. **Diário Oficial da União**, Brasília, 19 de maio de 1999. Seção 1, p. 11.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. Lei nº 10831 de 23 de dezembro de 2003. **Diário Oficial da União**, Brasília, 24 de dezembro de 2003. Seção 1, p. 8.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. Portaria nº 158 de 8 de julho de 2004. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 de julho de 2004. Seção 1, p. 5.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. Decreto nº 6323 de 27 de dezembro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, 28 de dezembro de 2007, Seção 1, p. 2.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. Instrução Normativa nº 54 de 22 de outubro de 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, 23 de outubro de 2008a, Seção 1, p. 36.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. Instrução Normativa nº 64 de 18 de dezembro de 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, 19 de dezembro de 2008b, Seção 1, p. 21.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: IAC, 2009. 77 p.
- CAMPANHOLA, C.; VALARINI, P. J. A agricultura orgânica e seu potencial para o pequeno agricultor. **Cadernos de Ciencia e Tecnologia**, v. 18, n. 1, p. 69–101, 2001.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A. **Humosfera**. Campos dos Goytacazes: CCTA/UENF, 2005. 309 p.
- CARSON, R. **Silent spring**. Boston: Houghton Mifflin, 1962. 378 p.
- CASTRO NETO, N.; DENUZI, V. S. S.; RINALDI, R. N.; STADUTO, J. R. Produção orgânica: uma potencialidade estratégica para a Agricultura Familiar. **Revista Percursos**, v. 2, n. 2, p. 73–95, 2010.
- CHARLO, H. C. DE O.; OLIVEIRA, S. F. DE; VARGAS, P. F.; CASTOLDI, R.; BARBOSA, J. C.; BRAZ, L. T. Accumulation of nutrients in sweet peppers cultivated in coconut fiber. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 125–131, 2012.
- CHIBA, M. K.; CAMARGO, O. A. DE. Parâmetros de fertilidade do solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 427–448.
-

COELHO, R. I.; LOPES, J. C.; CARVALHO, A. J. C.; AMARAL, J. A. T.; MATTA, F. DE P. Nutritional status and growth characteristics of pineapple in dystrophic yellow latosol cultivated in function of NPK fertilization. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1696–1701, 2007.

DAROLT, M. R. **Agricultura orgânica: inventando o futuro**. Londrina: IAPAR, 2002. 41 p.

DAROLT, M. R. **A evolução da agricultura orgânica no contexto brasileiro**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.vidanocampoonline.com/index.php/artigos/851-a-evolucao-da-agricultura-organica-no-contexto-brasileiro>>. Acesso em: 25 maio 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Marco referencial em agroecologia**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2006a. 72 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006b. 306 p.

EPSTEIN, E. **The science of composting**. Lancaster: Technomic Publishing Company, 1997. 225 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. T. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 392 p.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 186 p.

FARIA, A. J. G. DE F.; SANTOS, A. C. M.; FREITAS, G. A.; RODRIGUES, L. U.; FIDELIS, R. R.; SILVA, R. R. Substratos alternativos na produção de mudas de pimentão. In: ENCONTRO DE CIÊNCIA DO SOLO DA AMAZÔNIA ORIENTAL, 1., 2014, Gurupá. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. p. 217-219.

FERREIRA, L. L.; ALMEIDA, A. E. D. S.; DA COSTA, L. R.; BEZERRA, F. M. S.; LIMA, L. A.; PORTO, V. C. N. Vermicompostos como substrato na produção de mudas de berinjela (*Solanum melongena*) e pimentão (*Capsicum annum*). **Holos**, v. 4, p. 269–277, 2014.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 421 p.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005.

FONSECA, M. F. A. C. **A institucionalização dos mercados de orgânicos no mundo e no Brasil: uma interpretação**. Seropédica: UFRuralRJ, 2005. 476 p.

FONSECA, M. F. A. C.; BARBOSA, S. C. A.; COLNAGO, N. F.; SILVA, G. R. R. **Agricultura orgânica: introdução às normas, regulamentos técnicos e critérios para acesso aos mercados dos produtos orgânicos no Brasil**. Niterói: Programa Rio Rural, 2009. 58 p.

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: UFV, 2006. 122 p.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009. 656 p.

- GOPINATH, K. A.; SAHA, S.; MINA, B. L.; PANDE, H.; SRIVASTVA, A. K.; GUPTA, H. S. Bell pepper yield and soil properties during conversion from conventional to organic production in Indian Himalayas. **Scientia Horticulturae**, v. 122, n. 3, p. 339–345, 2009.
- GROPPER, S. S.; SMITH, J. L.; GROFF, J. **Advanced nutrition and human metabolism**. Boston: Cengage Learning, 2009. 605 p.
- HERMAN, M. A. B.; NAULT, B. A.; SMART, C. D. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on bell pepper production and green peach aphid infestations in New York. **Crop Protection**, v. 27, n. 6, p. 996–1002, 2008.
- HUA, Y.; CLARK, S.; REN, J.; SREEJAYAN, N. Molecular mechanisms of chromium in alleviating insulin resistance. **The Journal of Nutritional Biochemistry**, v. 23, n. 4, p. 313–319, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatística da produção agrícola**. Brasília, 2015. 75 p.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF THE ORGANIC AGRICULTURE MOVEMENT (IFOAM). **Definition of organic agriculture**. Vignola, 2008. 1 p.
- INSTITUTE OF MEDICINE (IOM). **Recommended dietary allowances**. Washington, 1989. 150 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11260**: soil quality: determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution. Genebra, 1994. 10 p.
- JONES JUNIOR, J. R. **Hidroponics**: a practical guide for soilless grower. Boca Raton: CRC, 2005. 423 p.
- KAUR, A.; SINGH, J.; VIG, A. P.; DHALIWAL, S. S.; RUP, P. J. Cocomposting with and without *Eisenia fetida* for conversion of toxic paper mill sludge to a soil conditioner. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 21, p. 8192–8198, 2010.
- KENYANGI, A.; BLOK, W. Vermicompost as a component in potting mixes for growth promotion in ornamental plants. **Rwanda Journal**, v. 28, n. 1, p. 53–63, 2013.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1998.
- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452 p.
- KRISCHKE, P. J.; TOMIELLO, N. O comportamento de compra dos consumidores de alimentos orgânicos: um estudo exploratório. **Cadernos de Pesquisa Interdisciplinar em Ciências Humanas**, v. 10, n. 96, p. 27–43, 2009.
- LAGO, A.; LENGLER, L.; CORONEL, D. A.; SILVA, T. N. Agricultura familiar de produtos orgânicos: um olhar sob a ótica do marketing. **Revista Extensão Rural**, p. 22, 2006.
- LANDGRAF, M. D.; MESSIAS, R. A.; REZENDE, M. O. O. **A importância ambiental da vermicompostagem**: vantagens e aplicações. São Carlos: Rima, 2005. 106 p.
- LEFF, E. **Saber ambiental**: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. 6. ed. Petrópolis: Vozes, 2008. 343 p.
-

- LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, M. L.; SOUZA, K. W. DE. Características químicas e mineralógicas e a distribuição de fontes de fósforo em terras pretas de índio da Amazônia Ocidental. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (Ed.) **As terras pretas de índio na Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Editora UFAM, 2009. p. 212–224.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 1017–1122.
- LORENTZ, L. H.; LÚCIO, A. D.; HELDWEIN, A. B.; SOUZA, M. F.; MELLO, R. M. Estimativa da amostragem para pimentão em estufa plástica. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 1–4, 2002.
- LORENZENI, M. Z.; REZENDE, R.; SOUZA, A. H. C. S.; SERON, C. C.; MALLER, A. Estimativa da área foliar em função das dimensões lineares da folha de pimentão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 44., 2015, São Pedro. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2015. p. 1-4
- LOURENÇO, N. **Manual de vermicompostagem e vermicultura para a agricultura orgânica**. Porto: Publindústria, 2014. 230 p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 281 p.
- MARCUSSI, F. F. N. Uso da fertirrigação e teores de macronutrientes em planta de pimentão. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 642–650, 2005.
- MARCUSSI, F. F. N.; VILLAS BÔAS, R. L.; GODOY, L. J. G. DE; GOTO, R. Macronutrient accumulation and partitioning in fertigated sweet pepper plants. **Scientia Agrícola**, v. 61, n. 1, p. 62–68, 2004.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.
- MARTI, H. R.; MILLS, H. A. Calcium uptake and concentration in bell pepper plants as influenced by nitrogen form and stages of development. **Journal of Plant Nutrition**, v. 14, n. 11, p. 1177–1185, 1991.
- MELLO, S. C.; DECHEN, A. R.; MINAMI, K. Influência do boro no desenvolvimento e na composição mineral do pimentão. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 1, p. 99–102, 2002.
- MELO, G. M. P.; MELO, V. P.; BERTIPAGLIA, L. M. A. Introdução às práticas agrícolas. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.) **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 399–423.
- MELO, A. S. DE; BRITO, M. E. B.; DANTAS, J. D. D. M.; SILVA JÚNIOR, C. D. DA; FERNANDES, P. D.; BONFIM, L. V. Produção e qualidade do pimentão amarelo sob níveis de potássio em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 17–21, 2009.
- MOURA, W. M.; LIMA, P. C.; CASALI, W. D.; PEREIRA, P. R. G.; CRUZ, C. D. Eficiência nutricional para fósforo em linhagens de pimentão. **Horticultura Brasileira**, v. 19, n. 3, p. 306–312, 2001.
-

- NDEGWA, P. M.; THOMPSON, S. A.; DAS, K. C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. **Bioresource Technology**, v. 71, n. 1, p. 5–12, 2000.
- NESMITH, D. S.; BRIDGES, D. C.; BARBOUR, J. C. Bell pepper responses to root restriction. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 12, p. 2763–2776, 1992.
- NETO, M. L. F.; SARCINELLI, P. N. Agrotóxicos em água para consumo humano: uma abordagem de avaliação de risco e contribuição ao processo de atualização da legislação brasileira. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 69–78, 2004.
- NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH (NIH). **Dietary supplement fact sheet: chromium**. [S.l.], 2016. Disponível em: <www.ods.od.nih.gov>. Acesso em: 30 nov. 2016.
- NUNES, R. R.; BONTEMPI, R. M.; MENDONÇA, G.; GALETTI, G.; REZENDE, M. O. O. Vermicomposting as an advanced biological treatment for industrial waste from the leather industry (tanneries). **Journal of Environment Science and Health, Part B**, v. 51, n. 5, p. 271–277, 2016.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O. Lixiviação de nitrato em um latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 1, p. 171–180, 2001.
- OLIVEIRA, J. E. D.; MARCHINI, J. S. **Ciências nutricionais**. São Paulo: Sarvier, 2008. 760 p.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (UN-FAO). **Guidelines for soil description**. Roma, 2006. 109 p.
- PAARLBERG, R. L. Managing pesticide use in developing countries. **Environment: science and policy for sustainable development**, v. 34, n. 4, p. 17–17, 1992.
- PATZEL, N.; STICHER, H.; KARLEN, D. L. Soil fertility: phenomenon and concept. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, n. 2, p. 129–142, 2000.
- PEREIRA, A. L. **Cultura do pimentão**. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, 1990. 49 p.
- PIVETTA, C. R.; HELDWEIN, A. B.; TAZZO, I. F.; MALDANER, I. C.; DALBIANCO, L.; STRECK, N. A.; MACHADO, R. M. A. Evapotranspiração máxima do tomateiro sob estufa plástica em função de variáveis fenométricas e meteorológicas. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 707–714, 2011.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 2002. 533 p.
- PROTESTE. **Pesticidas: perigo invisível**. São Paulo: Associação Brasileira de Defesa do Consumidor, 2016. 10 p.
- REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. **Plant analysis: a interpretation manual**. Callingwood: CSIRO, 1997. 572 p.
- REZENDE, M. O. O. Solo e ambiente. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 55–65.
- RIBEIRO, L. G.; LOPES, J. C.; MARTINS FILHO, S.; RAMALHO, S. S. Adubação orgânica na produção de pimentão. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 2, p. 134–137, 2000.
- RICCI, M. S. F. **Manual de vermicompostagem**. Porto Velho: EMBRAPA Rondônia, 1996. 25 p.
-

- RIGA, P.; ANZA, M. Effect of magnesium deficiency on pepper growth parameters: implications for determination of magnesium critical value. **Journal of Plant Nutrition**, v. 26, n. 8, p. 1581–1593, 2003.
- RINALDI, M. M.; SANDRI, D.; RIBEIRO, M. DE O.; AMARAL, A. G. DO. Características físico-químicas e nutricionais de pimentão produzido em campo e hidroponia. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 3, p. 558–563, 2008.
- SAMINÊZ, T. C. O.; DIAS, R. P.; NOBRE, F. G. A.; MATTAR, R. G. H.; GONÇALVES, J. R. A. **Legislação e os mecanismos de controle e informação da qualidade orgânica no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2008. 8 p.
- SANTOS, J. O.; SANTOS, R. M. S.; BORGES, M. G. B.; FERREIRA, R. T. F. V.; SALGADO, A. B.; SANTOS SEGUNDO, O. A. A evolução da agricultura Orgânica. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 35–41, 2012.
- SANTOS, M. R.; SEDIYAMA, M. A. N.; SALGADO, L. T.; VIDIGAL, S. M.; REIGADO, F. R. Production of sweet pepper seedlings in substrates containing vermicompost. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 4, p. 572–578, 2010.
- SCIVITTARO, W. B.; MELO, A. M. T. A.; TAVARES, M.; FILHO, J. A. A.; CARVALHO, C. R. L.; RAMOS, M. T. B. Caracterização de híbridos de pimentão em cultivo protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 17, n. 2, p. 147–150, 1999.
- SILVA, E. G.; TAKATA, W. H. S.; JÚNIOR, M. X. DE O.; SILVA, J. D.; GOTO, R. Teores de macronutrientes em plantas de pimentão enxertadas sob fertirrigação. **Irriga**, v. 118, n. 4, p. 120–131, 2013.
- SILVA, M. A. A. E; ESCOBEDO, J. F.; GALVANI, E. Influência da cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.) nos elementos ambientais em ambiente protegido. **Irriga**, v. 7, n. 3, p. 230–240, 2002.
- SILVA, M. A. G.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; FERNANDES, H. G.; GRANJA, F. A.; SCIVITTARO, W. B. Efeito do nitrogênio e potássio na nutrição do pimentão cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 913–922, 2001.
- SILVA, P. S. DA; SOUZA, R. B. DE; TAKAMORI, L. M.; SOUZA, W. S. DE; SILVA, G. P. DE P.; SOUZA, J. M. M. DE. Produção de mudas de pimentão em substrato de coco verde fertirrigadas com biofertilizante em sistema orgânico. **Horticultura Brasileira**, v. 28, n. 2, p. 2714–2720, 2010.
- SOUZA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteira e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 15 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.
- TAN, K. H. **Principles of soil chemistry**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1998. 560 p.
- TERRAZZAN, P.; VALARINI, P. J. Situação do mercado de produtos orgânicos e as formas de comercialização no Brasil. **Informações Econômicas**, v. 39, n. 11, p. 27–41, 2009.
- THOR, M. Y.; HARNACK, L.; KING, D.; JASTHI, B.; PETTIT, J. Evaluation of the comprehensiveness and reliability of the chromium composition of foods in the literature. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 24, n. 8, p. 1147–1152, 2011.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillian Publishing, 1990. 754 p.
- TOBIAŠOVÁ, E. The effect of organic matter on the structure of soils of different land uses. **Soil and Tillage Research**, v. 114, n. 2, p. 183–192, 2011.
-

- URCHEI, M. A.; PADOVAN, M. P.; LEONEL, L. A. K.; KOMORI, O. M.; SAGRILO, E.; MOTTA, I. S.; SOUSA, M. T.; PASCHOALICK, H. N. S. Implantação de polos agroecológicos para o desenvolvimento territorial da agricultura familiar em Mato Grosso do Sul, Brasil: dificuldades e avanços. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 2879–2882, 2009.
- VENTURINI, S. F.; ANTONIOLLI, Z. I.; GIRACCA, E. M. N.; VENTURINI, E. F.; GIRALDI, C. M. Use of Vermicompost in the Common Bean Crop. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 9, n. 1, p. 45–48, 2003.
- VIG, A. P.; SINGH, J.; WANI, S. H.; SINGH DHALIWAL, S. Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* (Savigny). **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 7941–7945, 2011.
- VIQUE, C. C.; TEISSEDRE, P. L.; CABANIS, M. T.; CABANIS, J. C. Determination and levels of chromium in french wine and grapes by graphite furnace atomic absorption spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 45, n. 5, p. 1808–1811, 1997.
- VITTI, G. C. **Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. 37 p.
- WESZ JUNIOR, V. J. Política pública de agroindustrialização na agricultura familiar: uma análise do Pronaf-Agroindústria. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 4, p. 567–596, 2011.
-

CONSIDERAÇÕES FINAIS

CONCLUSÃO E ANEXOS

- M1 — METODOLOGIAS PARA ANÁLISES QUÍMICAS
- M2 — METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO Cr
- M3 — VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA ANALÍTICA
- M4 — OUTRAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE

Aventura, excitação... Um Jedi anseia não por essas coisas
Mestre Yoda

SUMÁRIO

1.	CONCLUSÃO FINAL	269
2.	ANEXOS	271
M1.	METODOLOGIAS PARA ANÁLISES QUÍMICAS	271
M1.1.	Sólidos totais (ST)	271
M1.2.	pH	271
M1.3.	Matéria orgânica (MO)	271
M1.4.	Carbono orgânico total (TOC)	271
M1.5.	Capacidade de troca catiônica (CTC)	271
M1.6.	Relação C:N	273
M2.	METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DE Cr.....	273
M2.1.	Cr total	273
M2.2.	Cr disponível total — Cr (III) e Cr (VI)	273
M2.3.	Cr (VI)	273
M2.4.	Cr (III)	273
M3.	VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA ANALÍTICA	274
M3.1.	Linearidade.....	274
M3.2.	Limite de detecção e de quantificação	274
M3.3.	Sensibilidade	275
M3.4.	Recuperação	275
M3.5.	Exatidão	275
M3.6.	Precisão	276
M4.	OUTRAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE	276
M4.1.	Classe textural.....	276
M4.2.	Teor de carbono orgânico dos HAs e DOM	278
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	279

1. CONCLUSÃO FINAL

As conclusões parciais, apresentadas ao final do Capítulo I, Capítulo II e Capítulo III, suportaram as seguintes conclusões finais:

- i. Ao findar as atividades de pesquisa, conclui-se que a tese, abordada e defendida neste trabalho, de que é possível aplicar a vermicompostagem como tecnologia viável para o tratamento e reaproveitamento de resíduos de curtume, é verdadeira e plausível de defesa, tendo em vista os bons resultados obtidos, apresentados e discutidos nos mais variados nichos do saber, da química — ciência exata e da natureza — às ciências agrônômicas e da terra, além das áreas ambientais, biológicas e sociais;
- ii. Quanto ao monitoramento da vermicompostagem, as variações nos valores dos atributos analisados (pH, TOC, MO, relação C:N etc.) indicaram que os vermicompostos atingem a estabilidade e a maturação desejada nas condições aplicadas neste trabalho;
- iii. Além disso, no que se refere ao teor de Cr, ao final da vermicompostagem todos os valores de Cr (VI) estavam abaixo do limite de quantificação (LOQ). Assim, conclui-se que a vermicompostagem é uma tecnologia eficiente na bioconversão (redução) do Cr (VI) em Cr (III), reduzindo-o a uma concentração de até $158,82 \mu\text{mol Cr (g VRC)}^{-1}$ (μmol de cromo por grama de vermicomposto);
- iv. Protagonistas do processo de vermicompostagem, as minhocas *E. fetida* se adaptam ao meio vermicompostor, se desenvolvendo bem, principalmente nos tratamentos contendo resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL), para além da adaptação e desenvolvimento das minhocas do vermicompostor controle (VRC—STD);
- v. No mais, os atributos de fertilidade (MO, TOC, CTC etc.) determinados nos vermicompostos controle (VRC—STD) se desenvolvem aquém dos resultados obtidos nas amostras contendo resíduos de curtume (VRC—L, VRC—A e VRC—AL). Dentre elas, os melhores resultados foram obtidos nos vermicompostos contendo as aparas curtidas de couro wet-blue (VRC—A) e naqueles contendo a mistura de ambos os resíduos, lodo e aparas (VRC—AL);
- vi. Quanto a composição dos vermicompostos, a vermicompostagem da amostra VRC—AL indicou que é possível processar ambos os resíduos de curtume, lodo e aparas, com resultados melhores ou iguais aos observados nestas amostras de forma singular, VRC—A e VRC—L;
- vii. Ademais, ao determinar o êxito na obtenção dos vermicompostos, os mesmos foram avaliados quanto à sua capacidade hormono-similar, no que se refere ao seu efeito auxino-similar. Os resultados são satisfatórios uma vez que ambos os extratos analisados — DOM e HAs obtidos a partir dos vermicompostos em diferentes estágios de maturação — são bioativos em testes de germinação com sementes de alface *Lactuca sativa*;
- viii. Porém, estas bioatividades são diferentes. Apesar da DOM apresentar atividade hormono-similar, o efeito observado é consideravelmente menor que os resultados obtidos nos testes com os HAs. Além disso, o tempo de vermicompostagem interfere nas bioatividades. O efeito auxino-similar dos HAs aumenta com o tempo de maturação, como consequência das transformações ocorridas na MO;
- ix. Em geral, os HAs dos vermicompostos maduros (M) tendem a apresentar efeito auxino-similar. Aquém destes resultados, os vermicompostos frescos (F) não apresentam bioatividade — exceto no vermicomposto VRC—A, o qual é bioativo em todos os seus estágios de maturação;
- x. A composição química dos HAs não permite compreender por completo o efeito bioestimulante dos HAs, quer pela complexidade dos mecanismos e vias metabólicas, quer pela concentração das moléculas envolvidas. Ao dividir os compostos em classes, é possível observar quais apresentam maior efeito na bioatividade dos HAs. Neste caso, os monossacarídeos e os ácidos carboxílicos de cadeia alifática e, principalmente, os de cadeia aromática;

- xi. Considerando que a concentração mais alta de um composto bioativo em uma amostra sem atividade hormono-similar foi de $96,02 \mu\text{g g}^{-1}$, referente aos ácidos carboxílicos de cadeia aromática na amostra HA—L—F, considera-se que esta concentração é o limite acima do qual o efeito bioestimulante dos HAs se inicia;
- xii. Por último, os vermicompostos foram aplicados no cultivo orgânico do pimentão em ambiente protegido. Conclui-se que incorporar vermicompostos aos substratos é bioestimulante às plantas, influenciando positivamente seu desenvolvimento, além de elevar a produção de frutos;
- xiii. Em geral, a amostra controle (GBP—LAd) e referência (GBP—NPK) se desenvolvem e produzem aquém das amostras contendo vermicompostos (GBP—VRC) e, principalmente, se comparadas àquelas que receberam vermicompostos contendo resíduos de curtume (GBP—L, GBP—A e GBP—AL);
- xiv. Nestas amostras, nas condições experimentadas nesse trabalho, cada planta produz até 3 pimentões, ao passo que na amostra referência (GBP—NPK) colhe-se apenas 1 fruto;
- xv. Quanto ao tipo de resíduo de curtume presente nos vermicompostos, apesar da amostra VRC—L não ser bioestimulante para as plantas, a presença do lodo de curtume vermicompostado não apresenta malefício algum aos pimentões;
- xvi. Ao investigar a dinâmica do Cr nas plantas, apenas o Cr (III) é detectado e quantificado, porém abaixo do valor recomendado pela USDA para o consumo humano ($25,0\text{--}35,0 \mu\text{g Cr dia}^{-1}$). Assim, os teores de Cr determinados nos frutos indicam que os pimentões colhidos estão aptos para o consumo, além de não apresentam riscos para a saúde humana e segurança alimentar; e
- xvii. Por último, a presença dos resíduos de curtume nos vermicompostos não apresenta influência sobre os teores de Cr nos frutos. A concentração de Cr (III) nos pimentões colhidos nas amostras GBP—L, GBP—A e GBP—AL são estatisticamente iguais às concentrações determinadas nos frutos que receberam o vermicomposto controle (VRC—STD), em uma mesma concentração, 1,5%, 3,0% ou 6,0% V/V.

Assim, cada etapa deste trabalho se soma, corrobora e se complementa a fim de compreender este processo complexo e natural, que é a vermicompostagem. Ao longo destes 3 capítulos, nota-se que os melhores vermicompostos são aqueles com maior atividade hormono-similar, os quais são, também, os mais bioativos no cultivo orgânico de pimentão. Além disso, a presença de amostras controle e referência permitiram comparar os resultados, evidenciando os benefícios dos resíduos de curtume, em todas as etapas deste estudo.

Por fim, a solução apresentada — produção de vermicompostos — para o passivo ambiental dos resíduos de curtume se demonstrou eficiente na produção de insumos orgânicos para o cultivo de pimentão em ambiente protegido. Consideram-se assim concluídas as atividades propostas neste doutorado e seus objetivos alcançados.

Como perspectiva futura, propõe-se investigar outros tipos de ação hormono-similar e, também, a aplicação dos vermicompostos no cultivo de outras plantas de interesse econômico e social, preferencialmente voltado à agricultura familiar, orgânica e de base ecológica.

2. ANEXOS

M1. METODOLOGIAS PARA ANÁLISES QUÍMICAS

Os itens a seguir apresentam as metodologias adotadas nas análises de caracterização dos resíduos frescos, no monitoramento da vermicompostagem e, também, nas análises de caracterização do solo.

M1.1. Sólidos totais (ST)

Para determinação dos ST, ~ 10,0 g (com precisão de 0,1 mg) de amostra foram colocados em um cadinho previamente tarado e levado a estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até peso constante. Após seu resfriamento em um dessecador hermeticamente fechado, determinou-se o percentual de ST, via análise gravimétrica (ISO, 1993).

M1.2. pH

Para a determinação pH, ~ 10,0 g (com precisão de 0,1 mg) da amostra foram dissolvidos em 50,0 mL de solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, sob agitação periódica durante 30 min. Em seguida, os pHs foram determinados utilizando um pHmetro Tecnal modelo pH Meter TEC-2 (Piracicaba, Brasil) (ISO, 1994a).

M1.3. Matéria orgânica (MO)

Na determinação do teor de MO, pesaram-se ~ 10,0 g (com precisão de 0,1 mg) de amostra, submetendo-a a uma calcinação à temperatura de 550°C durante 4 h. Após seu resfriamento em um dessecador hermeticamente fechado, determinou-se o percentual de MO, via análise gravimétrica (NEN, 2013).

M1.4. Carbono orgânico total (TOC)

As análises de TOC foram realizadas ao oxidar 0,1 g de amostra a 900°C sob um fluxo de O_2 a $0,3 \text{ L min}^{-1}$. Utilizou-se um espectrofotômetro TOC-V CPH Shimadzu, acoplado ao módulo para amostras sólidas e detector espectrofotométrico operante na região do infravermelho SSM-5000A Shimadzu (Kyoto, Japão).

M1.5. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A CTC foi calculada pela soma da acidez trocável (A) e a soma das bases trocáveis (B) (Equação 1 — M1). Em seguida, a saturação por bases (V%) foi calculada (Camargo et al., 2009; ISO, 1994b, 1994c)¹.

$$\text{CTC} = \text{A} + \text{B}$$

(Equação 1 — M1)

Onde: CTC é a capacidade troca catiônica $\text{cmol}_\text{c} \text{ kg}^{-1}$

A é a acidez trocável $\text{cmol}_\text{c} \text{ kg}^{-1}$

B são as bases trocáveis $\text{cmol}_\text{c} \text{ kg}^{-1}$

¹ Método adaptado

M1.5.1. Acidez trocável (A)

Para a determinação de A, em um erlenmeyer de 125,0 mL foram pesados ~ 5,0 g de amostra e 50,0 mL de uma solução de KCl 1,0 mol L⁻¹. A suspensão agitada durante 30 min e, em seguida, filtrada em papel de filtro. Além disso, 2 porções de 10,0 mL da solução de KCl 1,0 mol L⁻¹ foram adicionadas ao filtro. Na sequência, o filtrado foi titulado com NaOH 0,01 mol L⁻¹ e, a acidez trocável foi calculada (Equação 2 — M1). O valor obtido corresponde à soma das concentrações dos íons Al⁺³ e H⁺ (ISO, 1994; Camargo et al., 2009).

$$A = [\text{Al}^{+3}] + [\text{H}^{+}] = \left(\frac{C \times V}{m} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 2 — M1})$$

Onde: A é a acidez trocável cmol_c kg⁻¹

C é a concentração da solução padronizada de NaOH mol L⁻¹

V é o volume titulado de NaOH L

m é a peso da amostra kg

M1.5.2. Bases trocáveis (B)

Para a determinação de B, em um erlenmeyer de 125,0 mL foram adicionados ~ 5,0 g de amostra e 50,0 mL de uma solução de NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹. A suspensão foi agitada ocasionalmente durante 30 min e, em seguida, permaneceu em repouso por 24 h. Após este tempo, a solução foi filtrada e o filtrado foi separado para a determinação das concentrações dos íons Ca⁺², Mg⁺², Na⁺ e K⁺, as quais foram somadas para o cálculo das bases trocáveis (Equação 3 — M1). Estas determinações foram realizadas no Laboratório de Saneamento (SHS), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) (ISO, 1994; Camargo et al., 2009).

$$B = [\text{Ca}^{+2}] + [\text{Mg}^{+2}] + [\text{Na}^{+}] + [\text{K}^{+}] \quad (\text{Equação 3 — M1})$$

Onde: B é a soma das bases trocáveis cmol_c kg⁻¹

[] são as concentrações dos nutrientes, dividido pela carga do respectivo íon cmol_c kg⁻¹

M1.5.3. Saturação por bases (V%)

O cálculo de V% foi realizado dividindo a CTC pela soma das bases trocáveis (B) (Equação 4 — M1) (ISO, 1994; Camargo et al., 2009).

$$V\% = \left(\frac{CTC}{B} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 4 — M1})$$

Onde: V% é a saturação por bases

CTC é a capacidade de troca catiônica cmol_c kg⁻¹

B é a soma das bases trocáveis cmol_c kg⁻¹

M1.6. Relação C:N

A relação C:N foi calculada por meio da razão entre os teores de C e N, divididos por seus respectivos pesos atômicos (Equação 5 — M1). Para determinação dos teores de C e N, ~ 25,0 mg de amostras foram pesadas e acondicionadas em cápsulas de estanho. Em seguida, as amostras foram inseridas em um analisador elementar Perkin Elmer Series II CHNS/O Analyser 2400 (Waltham, EUA). Estas análises foram realizadas na EMBRAPA Instrumentação (São Carlos, SP).

$$\text{Relação C:N} = \left(\frac{C}{12,01} \right) \div \left(\frac{N}{14,00} \right) \quad (\text{Equação 5 — M1})$$

M2. METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DE Cr

Os itens a seguir apresentam as metodologias adotadas na determinação dos teores de Cr nos resíduos frescos, no monitoramento da vermicompostagem e, também, no estudo da dinâmica do Cr nas plantas de pimentão (*C. annuum* L.).

Determinaram-se os teores de cromo total e disponível — Cr (III) e Cr (VI) — nos resíduos frescos e, também, nas amostras ao longo da vermicompostagem. A diferença deu-se, primeiramente, na metodologia de abertura (extração), seguido pela determinação em espectrometria de absorção atômica (AAS).

O espectrômetro utilizado foi um Perkin Elmer PinAAcle 900T (Norwalk, EUA) equipado com sistema de correção de fundo por lâmpada de deutério e utilizando uma lâmpada de cátodo oco de Cr (Perkin-Elmer, Norwalk, EUA) como fonte de radiação primária, operada a um comprimento de onda de 357,9 nm e com uma fenda de 0,7 nm.

M2.1. Cr total

Para a determinação do Cr total, as amostras foram abertas por MAE e o teor de Cr determinado via espectrometria de absorção atômica (AAS). Para a abertura, em 0,25 g de amostra foram adicionados 7,0 mL de HNO₃ e 2,0 mL de H₂O₂. O tempo de extração foi de 49 min a uma potência de 1305 W. Para isso, foi utilizado um micro-ondas Speedwave Berghof (Eningen, Alemanha) (USEPA, 1994).

M2.2. Cr disponível total — Cr (III) e Cr (VI)

Para a determinação dos íons Cr em solução, agitou-se 1,0 g de amostra em 50,0 mL de uma solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ durante 1 h. Em seguida, filtrou-se a solução em filtro de papel. O cromo disponível total foi determinado via AAS.

M2.3. Cr (VI)

Para a separação do Cr (VI), 10,0 mL da solução anterior foram coletados com a finalidade de precipitar o Cr (III). Para isso, adicionou-se NaOH 0,01 mol L⁻¹ para ajuste do $K_{ps} \text{Cr(OH)}_3 = 6,7 \cdot 10^{-31}$. Após 24 horas em repouso, 5,0 mL do sobrenadante foi coletado para determinação do Cr (VI) em solução, via AAS.

M2.4. Cr (III)

O teor de Cr (III) foi calculado pela diferença entre o teor de Cr total disponível e a concentração de Cr (VI).

M3. VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA ANALÍTICA

As metodologias analíticas para determinações químicas e espectrométricas foram validadas, quando cabíveis, de acordo com os documentos INMETRO DOC CGCRE-008 (Orientação sobre validação de métodos analíticos) e ANVISA Resolução RE nº 899 (Guia para validação de métodos analíticos e bioanalíticos) (NUNES, SANTOS e REZENDE, 2016; BRASIL, 2003; INMETRO, 2003).

Os parâmetros validados foram:

- i. Linearidade;
- ii. Limite de detecção (LOD);
- iii. Limite de quantificação (LOQ);
- iv. Sensibilidade;
- v. Recuperação;
- vi. Exatidão; e
- vii. Precisão.

Os procedimentos laboratoriais, analíticos ou não, foram realizados de acordo com os quesitos, quando cabíveis, da norma ISO 17.025 e com os princípios das Boas Práticas de Laboratório (BPL), a fim de garantir a rastreabilidade e o gerenciamento da qualidade, agregando valor e credibilidade aos resultados obtidos (ISO, 1999).

M3.1. Linearidade

Para determinação da linearidade, foi construída uma curva analítica com 10 pontos, em diferentes concentrações. A equação da reta, correspondente à curva analítica (Equação 1 — M1), foi determinada via regressão linear (método dos mínimos quadrados) (BRASIL, 2003; INMETRO, 2003).

$$y \pm S_y = (a \pm S_a) \times x \pm (b \pm S_b) \quad (\text{Equação 1 — M3})$$

Onde: y é a resposta medida (concentração)

a é o coeficiente angular, a inclinação da curva analítica

x é a concentração analisada

b é o coeficiente linear, a interseção da reta com o eixo y

S_a é o desvio-padrão do coeficiente angular a

S_b é o desvio-padrão do coeficiente linear b

S_y é o desvio-padrão da concentração

Os parâmetros lineares a e b e seus desvios-padrão, o coeficiente de correlação e o desvio da concentração, foram calculados pelo software OriginPro versão 9.1.

M3.2. Limite de detecção e de quantificação

Os limites de detecção e quantificação (LOD e LOQ) foram calculados de acordo com a Equação 2 — M3 e Equação 3 — M3, respectivamente. O cálculo se baseou no método da curva analítica (BRASIL, 2003; INMETRO, 2003).

$$LOD = 3 \times \left(\frac{S_a}{b} \right) \quad (\text{Equação 2 — M3})$$

$$LOQ = 10 \times \left(\frac{S_a}{b} \right) \quad (\text{Equação 3 — M3})$$

Onde: LOD é o limite de detecção

LOQ é o limite de quantificação

S_a é o desvio-padrão de a (coeficiente angular)

b é o intercepto da curva analítica (coeficiente linear)

M3.3. Sensibilidade

A sensibilidade do método foi determinada utilizando a equação da reta do método.

Segundo orientação do INMETRO, a sensibilidade é o coeficiente angular da curva analítica (INMETRO, 2003).

M3.4. Recuperação

Os ensaios para recuperação foram realizados de acordo com a metodologia sugerida pelo INMETRO.

A recuperação foi determinada ao comparar a resposta analítica do método na presença e na ausência da matriz (vermicomposto). Pelas concentrações obtidas, calculou-se a recuperação do método (Equação 4 — M3) (INMETRO, 2003).

$$R(\%) = \left(\frac{C_f - C_n}{C_p} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 4 — M3})$$

Onde: R(%) é o percentual de recuperação

C_f é a concentração determinada na amostra fortificada

C_n é a concentração determinada na amostra não fortificada

C_p é a concentração determinada no padrão analítico

M3.5. Exatidão

A exatidão foi avaliada via recuperação do método, de acordo com o INMETRO. Neste sentido, os resultados obtidos na recuperação do método foram utilizados para o cálculo da exatidão (Equação 5 — M3) (INMETRO, 2003).

$$E = \left(\frac{C_f}{C_p} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 5 — M3})$$

Onde: E é a exatidão do método

C_f é a concentração experimental (obtida)

C_p é a concentração teórica (esperada)

A ANVISA recomenda que os ensaios para determinação da exatidão sejam verificados a partir de, no mínimo, 9 determinações contemplando a faixa de trabalho do método, contendo três concentrações: uma baixa, uma média e outra alta, com três replicatas cada (BRASIL, 2003).

M3.6. Precisão

A precisão foi avaliada com base nos resultados obtidos na análise da recuperação do método. De acordo com o INMETRO e ANVISA, a precisão deve ser determinada por meio do coeficiente de variação (CV) (Equação 6 — M3) (BRASIL, 2003; INMETRO, 2003).

$$CV = \left(\frac{S_C}{M_C} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 6 — M3})$$

Onde: CV é o coeficiente de variação

M_C é a média das concentrações obtidas

S_C é o desvio-padrão das concentrações obtidas

M4. OUTRAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE

M4.1. Classe textural

A classe textural da amostra de latossolo amarelo distrófico (LAd) foi determinada por meio da distribuição de suas frações granulométricas (PSD). Para isso, em um becker de 250,0 mL foram adicionadas 20,0 g da amostra e 100,0 mL de uma solução dispersante. A solução dispersante foi preparada adicionando 45,7 g de hexametáfosfato de sódio em 1 L de água destilada, permanecendo em agitação até dissolução completa do reagente. A amostra e a solução dispersante permaneceram em agitação mecânica a 30 rpm durante 16 h. A suspensão foi transferida para uma proveta de 500,0 mL e 5 cm de diâmetro, passando por uma peneira com malha de 0,05 mm. O volume da proveta foi completado com água destilada. O material retido na peneira de 0,05 mm foi lavado com um jato forte de água e seco em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até peso constante (ISO, 1998; Camargo et al., 2009).

A análise granulométrica foi dividida em duas etapas: análise de argila e silte (partículas menores que 0,05 mm) e análise das partículas maiores que silte, ou seja, areia, pedregulhos e rochas.

A amostra de LAd foi classificada de acordo com os percentuais de seu PSD, o qual se baseia no diâmetro das partículas que compõe o solo (Tabela 1 — M4). Em seguida, a classe textural foi determinada por meio do diagrama proposto pelo IAC (Figura 1 — M4).

M4.1.1. Argila e silte

As determinações das frações silte e argila foram realizadas pelo método do densímetro. Inicialmente, a mistura foi agitada até completa suspensão das partículas. O densímetro foi inserido na proveta e o tempo exato do início da sedimentação foi anotado. Foram realizadas medições da densidade e da temperatura nos tempos 1, 2, 4, 8, 15 e 30 min e 1, 2, 4, 8 e 24 horas, a contar do início da sedimentação. Aproximadamente entre 15 e 20 segundos antes de cada leitura, o densímetro foi mergulhado lenta e cuidadosamente na dispersão. Após a leitura, o densímetro foi retirado da dispersão e colocado em uma proveta com água limpa, à mesma temperatura e volume da dispersão. O diâmetro máximo das partículas (d) do LAd em suspensão foi calculado (Equação 1 — M4), assim como seu percentual na suspensão (Equação 2 — M4) (ISO 11277, 1998; Camargo et al., 2009).

$$d = \sqrt{\frac{1000 \times \mu}{\delta - \delta_d}} \times \frac{a}{t} \quad (\text{Equação 1 — M4})$$

$$Q = N \times \frac{\delta}{\delta - \delta_d} \times \frac{V \times \delta_c \times (L - L_d)}{\frac{M_h}{100+h} \times 100} \quad (\text{Equação 2 — M4})$$

Onde: Q é a porcentagem de particulado na suspensão %
 d é o diâmetro máximo das partículas mm
 μ é o coeficiente de viscosidade da água valor tabelado
 δ é a massa específica dos grãos do solo valor tabelado
 δ_d é a massa específica do meio dispersor g cm⁻³
 a é a altura de queda das partículas valor tabelado
 t é o tempo de sedimentação s
 N é o percentual de material peneirado em 2 mm %
 V é o volume da suspensão mL
 L é a densidade na suspensão g cm⁻³
 L_d é a densidade no meio dispersor valor tabelado
 M_h é o peso do material úmido g
 h é a humidade do material %

Para efeito de cálculo, foram utilizados os valores de δ_d e δ_c iguais a 1,0 g cm⁻³, o valor de V foi de 1000,0 mL. Os valores tabelados se encontram na norma NBR 7181:1984.

M4.1.2. Pedregulho e areia

As determinações das frações pedregulho e areia foram realizadas via peneiramento, utilizando o material retido na peneira de 0,05 mm. Para isso, foi utilizado um jogo de peneiras com as malhas 4,8, 9,5, 19,0, 25,0, 38,0 e 50,0 mm. O sistema contendo todas as peneiras foi mantido em mesa agitadora durante dez minutos. O peso retido em cada fração foi anotado para cálculos posteriores. Calculou-se o percentual retido em cada peneira fazendo comparação com o peso inicial do LAd (ISO, 1998; Camargo et al., 2009).

Figura 1 – M4. Triângulo para a determinação de classes texturais.

FONTE: Camargo et al. (2009)

Tabela 1 – M4. Distribuição das frações granulométricas de um solo em função do diâmetro máximo de suas partículas.

Partícula	Diâmetro máximo mm
Argila	$d < 0,002$
Silte	$0,002 > d > 0,05$
Areia:	
Fina	$0,05 > d > 0,25$
Média	$0,25 > d > 0,5$
Grossa	$0,5 > d > 2$
Pedregulhos	$d > 2$

M4.2. Teor de carbono orgânico dos HAs e DOM

Os teores de C nos HAs e DOM foram calculados por meio do método Walkley & Black. Para isso, ~ 500,0 mg de LAd foram pesados em um erlenmeyer de 500,0 mL. Em seguida, foram adicionados 10 ,0mL de uma solução padronizada de $K_2Cr_2O_7$ 0,1 mol L⁻¹ e 20,0 mL de H₂SO₄ concentrado. Após agitar, a suspensão repousou por 30 min. Em seguida, foram adicionados 200,0 mL de água, 10,0 mL de H₃PO₄ concentrado e 1,0 mL de difenilamina 0,16%. O excesso de dicromato foi titulado com sulfato ferroso amoniacal [(NH₄)₂Fe(SO₄)2,6H₂O] 1,0 mol L⁻¹ (Sal de Mohr). Em seguida, calculou-se o teor de C orgânico com base no teor de cromato que não reagiu com a MO do solo (Equação 3 — M4) (EMBRAPA, 2005).

$$C = \frac{V \times M \times m_{eq}}{m_{am}} \times 100 \quad (\text{Equação 3 – M4})$$

Onde: C é o teor de carbono orgânico g kg^{-1}

V é o volume de Sal de Mohr titulado L

M é a concentração do sal de Mohr mol L^{-1}

m_{eq} é a massa equivalente de C 0,003 mg

m_{am} é a massa da amostra mg

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Saúde. ANVISA. Guia para validação de métodos analíticos e bioanalíticos, Resolução RE nº 899. **Diário Oficial da União**, Brasília, 02 de junho de 2003. Seção 1, p. 56.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: IAC, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2005. 212 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **DOC-CGCRE-008**: orientação sobre validação de métodos analíticos: DOC CGCRE-008. Brasília, 2003. 36 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17025**: general requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Genebra, 1999. 108 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10390**: soil quality: determination of pH. Genebra, 1994a. 5 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11260**: soil quality: determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution. Genebra, 1994b. 10 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11277**: soil quality: determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. Genebra, 1998. 30 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11465**: soil quality: determination of dry matter and water content on a mass basis – Gravimetric method. Genebra, 1993. 3 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14254**: soil quality: determination of exchangeable acidity in barium chloride extracts. Genebra, 1994c. 5 p.

NETHERLANDS NORMALISATION INSTITUTE (NEN). **NEN 5754**: determination of organic matter content in soil as loss-on-ignition. Delft, 2013. 10 p.

NUNES, R. R.; SANTOS, B. H. F.; REZENDE, M. O. O. Analytical procedures and method validation for determination of Chlorimuron Ethyl in sediments. **Open Access Library**, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Method 3051**: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, 1994. 14 p.

Eu serei tão breve que já acabei
Salvador Dalí