

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE PLANALTINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

DAHIANA OLIVEIRA RIBEIRO RODRIGUES

ECONOMIA CIRCULAR NA PRÁTICA:
Compostagem Descentralizada e Aquaponia no contexto urbano do DF

Brasília/DF
2026

DAHIANA OLIVEIRA RIBEIRO RODRIGUES

ECONOMIA CIRCULAR NA PRÁTICA:

Compostagem Descentralizada e Aquaponia no contexto urbano do DF

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Programa de Pós-Graduação de Ciência Ambientais, da UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Rodrigo Navarro

Brasília/DF

2026

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO.....	2
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	HIPÓTESES	3
4	JUSTIFICATIVA	4
5	REFERENCIAL TEÓRICO	6
5.1	COMPOSTAGEM	6
5.1.2	Caracterização Física e Química.....	6
5.1.3	Fases do Processo de Compostagem.....	7
5.1.3.5	Principais Métodos de Compostagem.....	9
5.1.4	Compostagem e suas conexões	10
5.1.5	Compostagem e Aquaponia	17
5.1.6	Aspectos Técnicos da Aquaponia	22
5.1.7	Desafios da Aquaponia	24
6	REFERÊNCIAS	29
	CAPÍTULO 1 - Economia Circular na prática: Compostagem Descentralizada e Aquaponia no contexto urbano do DF	35
	CAPÍTULO 2 - Análise do cenário de compostagem descentralizada do Distrito Federal e caracterização físico-química dos compostos.....	48
	CAPÍTULO 3 - Análise da integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem de podas urbanas	77

1 INTRODUÇÃO

A gestão sustentável de resíduos orgânicos urbanos representa um dos maiores desafios contemporâneos para as cidades, especialmente considerando que aproximadamente 55% dos resíduos sólidos urbanos são compostos por matéria orgânica. Este cenário é particularmente relevante no Distrito Federal (DF), onde o Serviço de Limpeza Urbana (SLU) destinou R\$ 28,5 milhões apenas para a operação do aterro sanitário em 2022. (SLU, 2023)

Diante deste contexto, emerge a necessidade de implementar soluções inovadoras alinhadas aos princípios da economia circular, capazes de transformar o que tradicionalmente seria descartado em recursos valiosos. Duas abordagens têm se destacado no contexto urbano: a aquaponia e a compostagem descentralizada.

A economia circular, conforme preconizado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), constitui-se em modelo econômico que substitui o padrão linear "extrair-produzir-descartar" pela lógica regenerativa de ciclos fechados, em que os resíduos de um processo se tornam insumos de outro, prolongando o valor dos materiais e reduzindo a extração de recursos naturais (IPEDF CODEPLAN, 2023). No contexto da gestão de resíduos orgânicos urbanos, essa perspectiva se traduz na recuperação de nutrientes antes destinados a aterros sanitários e em sua reinserção em cadeias produtivas locais, reduzindo custos operacionais e gerando compostos de valor agrônomico (VILAS BOAS DIAS; DIANA NAVARRO, 2022).

A aquaponia, um sistema integrado que combina a criação de peixes e o cultivo de plantas em recirculação de água, tem se mostrado uma alternativa promissora para a produção de alimentos em ambientes urbanos, otimizando o uso de água e nutrientes (MULAZZANI et al., 2021; MARK SCHOOR et al., 2024). Por outro lado, a compostagem descentralizada tem emergido como estratégia eficiente para o processamento local de resíduos orgânicos, reduzindo custos de transporte e disposição final, além de gerar compostos de qualidade para uso agrícola (VILAS BOAS DIAS; DIANA NAVARRO, 2022; ERMOLAEV et al., 2019)

A integração entre estes dois sistemas apresenta um potencial significativo para o fechamento de ciclos de nutrientes e o estabelecimento de modelos de economia circular em escala urbana. A água residuária da aquaponia, rica em nitrogênio, pode ser utilizada como insumo valioso para o processo de compostagem, especialmente de podas urbanas, que geralmente apresentam alta relação C/N (carbono/nitrogênio), otimizando assim ambos os processos.

O crescimento de iniciativas tanto de aquaponia quanto de compostagem no DF nos últimos anos indica uma tendência favorável à implementação destas práticas. Observa-se um movimento crescente nesta direção, com empresas de pequeno e médio porte já operando na conversão de resíduos em compostos orgânicos, e paralelamente, iniciativas descentralizadas em condomínios e instituições de ensino demonstrando o potencial da região em se tornar uma referência nacional em práticas de economia circular (IPEDF CODEPLAN, 2023).

2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo é analisar cenários de inovações no manejo de resíduos orgânicos, incluindo a compostagem e aquaponia, para geração de produtos úteis à agricultura sustentável e geração de emprego e renda nessa cadeia produtiva.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Analisar as propriedades físico-químicas e a qualidade agronômica dos compostos produzidos;
- Valorar, quantificar e construir cenários de produtos e serviços das empresas, condomínios e escolas que praticam compostagem no DF, visando produzir um primeiro levantamento desse tipo na região. Essa prospecção alcançará informações socioeconômicas dos envolvidos, entraves e potenciais, numa perspectiva de gerar informações que possam ser discutidas em âmbito legal (ambiente legislativo) e técnico (universidades, escolas, empresas etc.).
- delinear a cadeia produtiva da compostagem do DF, verificando as possibilidades de geração de emprego e renda.
- avaliar o potencial da água do processo de aquaponia como fornecedor de nitrogênio para os processos de compostagem com elevada relação de C/N.
- Identificar os principais desafios técnicos, operacionais e regulatórios para a implementação de sistemas integrados de aquaponia e compostagem em contexto urbano;

3 HIPÓTESES

As hipóteses deste estudo são:

- A prática da compostagem em empresas, condomínios e escolas no Distrito Federal resulta em uma variedade de produtos e serviços que podem ser quantificados e valorizados. Com isso, há possibilidade de desonerar a economia do DF, fomentando a compostagem descentralizada, de maneira a instituir programas de educação ambiental e geração de postos de trabalho nessas unidades;

- Os compostos resultantes do processo de compostagem apresentam segurança química e microbiana, permitindo seu uso sem a observação de passivos.

- A água residuária da aquaponia pode suprir eficientemente as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas urbanas, resultando em um composto orgânico com relação C/N equilibrada e nutricionalmente enriquecido;

O projeto propõe hipóteses que podem influenciar o desenvolvimento de modelos ambientais mais precisos e abrangentes. Ele visa entender a compostagem descentralizada e seus impactos ambientais, incluindo a segurança dos compostos e sua distribuição no ambiente. Essas informações podem contribuir para a criação de técnicas de manejo e tecnologias ambientais mais eficazes, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos. Além disso, a pesquisa pode informar políticas de gestão de resíduos e práticas agrícolas mais sustentáveis. Em suma, o projeto pode fornecer insights importantes para estratégias de conservação e gestão ambiental, impactando tanto o meio ambiente quanto a sociedade

4 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica pela necessidade premente de desenvolver soluções integradas para os desafios contemporâneos da gestão de resíduos orgânicos e produção de alimentos em contextos urbanos. A pesquisa sobre a integração entre aquaponia e compostagem descentralizada apresenta relevância em múltiplas dimensões: ambiental, econômica e social.

A disposição inadequada de resíduos orgânicos em aterros sanitários contribui significativamente para a emissão de gases de efeito estufa, particularmente metano, além de gerar chorume que pode contaminar solos e recursos hídricos (ABREU, 2018). Paralelamente, a produção convencional de alimentos em sistemas lineares demanda elevados volumes de água e insumos, muitos deles não renováveis. A integração entre aquaponia e compostagem representa uma alternativa que minimiza estes impactos, promovendo o uso eficiente de recursos e o fechamento de ciclos de nutrientes.

Os custos associados à gestão tradicional de resíduos orgânicos são expressivos. No Distrito Federal, apenas a operação do aterro sanitário representou um investimento superior a R\$ 28,5 milhões em 2022. Adicionalmente, entre 2005 e 2023, a taxa de limpeza pública cresceu 199,24% no DF (SLU, 2023). A implementação de sistemas integrados de aquaponia e compostagem tem o potencial de reduzir estes custos, além de gerar produtos de valor agregado (alimentos e compostos orgânicos), fomentando a economia local e criando oportunidades de emprego verde.

A implementação de sistemas integrados de aquaponia e compostagem em contextos urbanos pode contribuir para o fortalecimento da segurança alimentar e nutricional, a geração de emprego e renda, além de promover a educação ambiental e o engajamento comunitário.

Apesar do crescente interesse em práticas de economia circular urbana, existe uma lacuna significativa na literatura científica sobre a integração entre aquaponia e compostagem. Esta pesquisa contribui para preencher esta lacuna, gerando conhecimentos técnico-científicos aplicáveis não apenas ao DF, mas potencialmente transferíveis para outras regiões urbanas com desafios similares.

O estudo se alinha com diretrizes nacionais e internacionais de desenvolvimento sustentável, particularmente com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que estabelece a priorização de processos que promovam a recuperação e o aproveitamento energético de resíduos. Adicionalmente, contribui para o atingimento de múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), notadamente o ODS 11

(Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

A integração entre aquaponia e compostagem representa, portanto, não apenas uma solução tecnológica, mas uma abordagem sistêmica que responde simultaneamente a múltiplos desafios urbanos contemporâneos, com potencial para transformar o Distrito Federal em um modelo de referência em economia circular urbana.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

O Brasil enfrenta um desafio crescente na gestão de seus resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo gerado mais de 81,6 milhões de toneladas em 2024 — o equivalente a mais de 223 mil toneladas diárias, ou 384 kg por habitante ao ano (ABREMA, 2025). Deste montante, aproximadamente 55% correspondem à fração orgânica, que inclui resíduos de poda e jardinagem, restos alimentares e demais materiais biodegradáveis passíveis de valorização. Apesar do volume expressivo gerado, apenas cerca de 300 mil toneladas de resíduos orgânicos foram encaminhadas a unidades de compostagem em 2024, representando menos de 0,4% dos RSU gerados no país, evidenciando um enorme potencial subutilizado para o aproveitamento nutricional dessa fração por meio de processos de reciclagem orgânica.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 481/2017, a compostagem é definida como "processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem" (BRASIL, 2017).

5.1.1 Caracterização Física e Química

No aspecto biológico, a compostagem é conduzida por uma sucessão dinâmica de populações microbianas que se alternam conforme as condições do meio se transformam. Inicialmente, predominam bactérias mesofílicas que rapidamente consomem substâncias solúveis e facilmente degradáveis. À medida que a temperatura se eleva pela atividade metabólica, organismos termofílicos assumem o processo, acelerando a degradação de proteínas, lipídios e carboidratos complexos (RYCKEBOER et al., 2003).

Do ponto de vista químico, ocorrem processos oxidativos de substâncias orgânicas complexas, resultando na liberação de dióxido de carbono, água, energia na forma de calor, e na síntese de compostos húmicos estáveis. Durante este processo, nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, inicialmente imobilizados em formas orgânicas, são mineralizados e tornam-se disponíveis para absorção pelas plantas (EPSTEIN, 2011).

Segundo Primavesi (2016), a diversidade microbiana no processo de compostagem é essencial para a degradação eficiente dos diferentes compostos presentes nos resíduos orgânicos. Estima-se que mais de 2.000 espécies de bactérias

e 50 espécies de fungos participam ativamente deste processo, cada uma com papel específico na degradação de determinados compostos.

5.1.2 Fases do Processo de Compostagem

O processo de compostagem é tradicionalmente dividido em quatro fases principais, caracterizadas por mudanças na temperatura e na comunidade microbiana dominante (INSAM; DE BERTOLDI, 2007):

5.1.2.1 Fase Mesofílica Inicial

A fase mesofílica inicial marca o começo do processo de compostagem e geralmente dura de dois a três dias, embora possa variar conforme as características dos materiais e condições ambientais. Nesta etapa, a temperatura da pilha situa-se entre 25°C e 40°C, favorecendo a proliferação de bactérias e fungos mesofílicos (SOUZA; RESENDE, 2014). Estes microrganismos degradam rapidamente açúcares, amidos e proteínas simples, produzindo ácidos orgânicos que podem temporariamente reduzir o pH da pilha para valores entre 5,5 e 6,0. Como resultado deste metabolismo, há liberação significativa de calor, que gradualmente eleva a temperatura da massa em compostagem (ONWOSI et al., 2017).

5.1.2.2 Fase Termofílica

À medida que a temperatura ultrapassa 45°C, inicia-se a fase termofílica, considerada a mais ativa do processo. Esta etapa pode durar de algumas semanas a alguns meses, dependendo da composição dos resíduos e do manejo adotado. Durante este período, as temperaturas variam entre 45°C e 70°C, criando condições favoráveis para bactérias termofílicas e actinomicetos (BERNAL et al., 2009). Estas altas temperaturas são fundamentais para a higienização do composto, pois eliminam patógenos, sementes de plantas daninhas e larvas de insetos indesejáveis. Nesta fase, ocorre a degradação intensiva de lipídios, hemicelulose, celulose e outros polímeros complexos. O pH tende a se estabilizar em valores alcalinos, entre 7,5 e 8,5, devido à liberação de amônia durante a decomposição de proteínas (KIEHL, 2012).

5.1.2.3 Fase de Resfriamento

Após o esgotamento dos compostos mais facilmente degradáveis, a atividade microbiana diminui e, conseqüentemente, a temperatura começa a cair, caracterizando a fase de resfriamento. Esta etapa pode durar várias semanas, com as temperaturas retornando gradualmente à faixa mesofílica, entre 25°C e 40°C (EPSTEIN, 2011). Durante este período, organismos mesofílicos recolonizam a massa em compostagem, incluindo diversos fungos que contribuem para a degradação continuada de celulose e lignina remanescentes. É nesta fase que começam a se formar compostos húmicos mais estáveis, cruciais para a qualidade final do composto (INSAM; DE BERTOLDI, 2007).

5.1.2.4 Fase de Maturação

A fase final, denominada maturação ou cura, é caracterizada por uma reduzida atividade biológica e baixa produção de calor, com temperaturas próximas à ambiente. Esta etapa pode durar de um a dois meses ou mais, dependendo das condições ambientais e das características desejadas para o produto final (VALENTE et al., 2016). Durante a maturação, ocorrem processos de humificação, com a formação de substâncias húmicas complexas que conferem estabilidade ao composto. O produto final apresenta coloração escura, textura homogênea, pH estabilizado (geralmente entre 7,0 e 8,5) e odor agradável que lembra terra de mata. A relação C/N também atinge valores estáveis, tipicamente entre 10:1 e 15:1, indicando a maturidade do composto (SOUZA; RESENDE, 2014).

De acordo com Inácio e Miller (2009), o monitoramento da temperatura constitui uma ferramenta prática e eficiente para acompanhar as diferentes fases da compostagem e avaliar a eficiência do processo. Temperaturas persistentemente elevadas acima de 65°C podem indicar deficiência de umidade ou aeração inadequada, enquanto temperaturas abaixo do esperado podem sugerir excesso de umidade, relação C/N desequilibrada ou insuficiência de massa crítica para o desenvolvimento adequado do processo.

5.1.2.5 Principais Métodos de Compostagem

Diversos métodos de compostagem foram desenvolvidos para atender a diferentes escalas, contextos e objetivos. Cada método apresenta particularidades em

termos de operação, manejo, investimento necessário e adequação a diferentes tipos e volumes de resíduos. Os principais tipos relacionados diretamente ao estudo são:

Leiras Estáticas com Aeração Passiva

A aeração ocorre de forma passiva, por convecção natural, à medida que o ar quente sobe pela pilha, criando um efeito chaminé que puxa ar fresco pelas laterais (KIEHL, 2012). As leiras geralmente têm seção triangular ou trapezoidal, com altura entre 1,2 e 1,5 metros e largura da base entre 2 e 3 metros. Este método é de baixo custo operacional e demanda pouca mão de obra, mas tende a ser mais lento (4 a 6 meses) e pode apresentar zonas com aeração deficiente, especialmente em seu interior (PEREIRA NETO, 2011).

Vermicompostagem ou minhocário

A vermicompostagem é um processo de decomposição que combina a ação de minhocas (principalmente da espécie *Eisenia fetida*, conhecida como "minhoca californiana" ou "vermelha-da-califórnia") com microrganismos. As minhocas fragmentam, ingestionam e digerem o material orgânico, acelerando o processo de decomposição e produzindo o húmus de minhoca ou vermicomposto, um material de alta qualidade agrônômica (AQUINO et al., 2005). Segundo Lourenço e Coelho (2012), a vermicompostagem é particularmente eficiente na degradação de resíduos alimentares e pode ser implementada em pequena escala, inclusive em ambientes internos, sendo adequada para contextos urbanos. O processo é mais rápido que a compostagem convencional, e o produto final geralmente apresenta maior disponibilidade de nutrientes e melhores propriedades físicas.

Os métodos de compostagem diferem em grau de controle, custo e tempo de processo. As **leiras com revolvimento** periódico oferecem melhor controle de temperatura e homogeneidade do produto final em 3 a 4 meses, porém demandam maior mão de obra e área (INÁCIO; MILLER, 2009). As **leiras estáticas com aeração** forçada, desenvolvidas pela Universidade de Rutgers, reduzem a fase ativa para 30 a 60 dias por meio de sopradores acoplados a tubulações perfuradas, com maior controle do processo, embora impliquem custos de implantação e consumo energético mais elevados (EPSTEIN, 2011; VALENTE et al., 2016). Os **sistemas em reatores** fechados — verticais, horizontais ou rotativos — permitem decomposição em 7 a 15 dias com controle rigoroso de odores e uso eficiente do espaço, sendo mais indicados para operações urbanas de grande escala, porém com alto investimento inicial e exigência de

expertise técnica (PEREIRA NETO, 2011; VALENTE et al., 2016). Por fim, o **Bokashi**, método de fermentação anaeróbia de origem japonesa baseado em microrganismos eficientes, produz um fermentado orgânico rico em ácidos orgânicos e microrganismos benéficos em apenas 10 a 15 dias, sem geração de odores, o que o torna especialmente adequado para contextos urbanos com espaço reduzido (BOECHAT et al., 2013).

5.1.3 Compostagem e suas conexões

Mais recentemente, tem crescido o interesse por sistemas de compostagem descentralizada, realizados em pequena e média escala, próximos aos locais de geração dos resíduos. Estes sistemas incluem composteiras domésticas, comunitárias e institucionais, adaptando os métodos tradicionais para contextos urbanos (VIEIRA; SANTOS, 2023). Segundo Ermolaev et al. (2019), a compostagem descentralizada apresenta vantagens como redução dos custos de transporte, engajamento comunitário, educação ambiental e retenção local dos benefícios da compostagem. No Brasil, diversas experiências têm sido implementadas em condomínios, escolas, universidades e espaços comunitários, com resultados promissores (ABREU et al., 2018).

A escolha do método mais adequado depende de diversos fatores, incluindo o volume e tipo de resíduos, espaço disponível, recursos humanos e financeiros, e objetivos específicos do projeto. Em muitos casos, abordagens híbridas são adotadas, combinando elementos de diferentes métodos para atender às necessidades particulares de cada contexto (INÁCIO; MILLER, 2009).

No contexto urbano do Distrito Federal, observa-se uma diversidade de métodos sendo implementados, desde iniciativas domésticas e comunitárias utilizando composteiras e minhocários até operações de maior escala conduzidas por empresas especializadas que adotam sistemas de leiras com revolvimento mecânico (VIEIRA; SANTOS, 2023). Esta multiplicidade de abordagens reflete a adaptabilidade da compostagem a diferentes contextos e necessidades, constituindo-se como uma tecnologia versátil para a gestão sustentável de resíduos orgânicos em ambientes urbanos.

A compostagem de resíduos orgânicos é uma estratégia ambientalmente responsável e economicamente viável. Ao integrá-la à cadeia da agricultura familiar, podemos alinhar os princípios da Política Nacional de Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais (BRASIL, 2006) com os da Política Nacional de

Resíduos Sólidos (BRASIL, 2016). Podemos citar cinco princípios que convergem e sustentam essa abordagem:

- **Descentralização:** a agricultura familiar valoriza a produção local e a gestão descentralizada. Da mesma forma, a compostagem no nível das propriedades rurais permite que os resíduos orgânicos sejam transformados em adubo próximo ao local de geração. Isso reduz a necessidade de transporte de resíduos para longe e promove a economia de recursos.
- **Sustentabilidade Ambiental, Social e Econômica:** a compostagem é um processo sustentável que transforma resíduos orgânicos em um recurso valioso: o composto orgânico. Esse composto pode ser utilizado como fertilizante natural, melhorando a qualidade do solo e reduzindo a necessidade de insumos químicos. Além disso, a geração de empregos na compostagem beneficia a economia local.
- **Equidade na Aplicação das Políticas:** a agricultura familiar é diversificada e inclui diferentes grupos sociais, como mulheres, jovens e comunidades tradicionais. A compostagem oferece oportunidades de trabalho e renda para esses grupos, promovendo a equidade. A política de resíduos sólidos também busca a inclusão social e a participação ativa da população.
- **Participação dos Agricultores Familiares:** a compostagem deve ser uma iniciativa participativa, envolvendo os agricultores familiares desde o planejamento até a implementação. Eles podem contribuir com conhecimentos locais, práticas tradicionais e experiências práticas na gestão dos resíduos orgânicos. A participação ativa fortalece a política pública.
- **Promoção do Manejo Sustentável:** a compostagem é um exemplo de manejo sustentável dos resíduos. Ela evita a contaminação do solo e da água por resíduos orgânicos em aterros sanitários. Ao incorporar a compostagem na agricultura familiar, estamos promovendo práticas agrícolas mais saudáveis e preservando o meio ambiente.

Portanto, **a logística reversa da compostagem na agricultura familiar pode ser uma política pública eficaz**, beneficiando tanto o meio ambiente quanto as comunidades rurais

No Brasil, existe uma política específica para o pagamento de serviços ambientais. A Lei nº 14.119, promulgada em 13 de janeiro de 2021, instituiu a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA) (BRASIL, 2021). Essa legislação tem como objetivo concretizar o disposto no artigo 41 do Código Florestal de 2012, autorizando o Poder Executivo Federal a criar um programa de apoio e incentivo

à conservação do meio ambiente. A PNPSA busca compatibilizar o desenvolvimento das atividades produtivas com a preservação do patrimônio natural no Brasil.

A conexão entre a logística reversa da compostagem e os pagamentos por serviços ambientais no Brasil pode ser uma estratégia eficaz para promover a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais. Vamos explorar como esses princípios podem se alinhar:

- **Preservação dos Recursos Naturais:** A compostagem reduz a quantidade de resíduos orgânicos descartados em aterros sanitários, diminuindo a pressão sobre esses locais e evitando a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Ao integrar a compostagem à agricultura familiar, estamos contribuindo para a preservação dos recursos naturais, o que é fundamental para os pagamentos por serviços ambientais.
- **Sequestro de Carbono e Melhoria do Solo:** A compostagem transforma resíduos orgânicos em composto rico em nutrientes. Esse composto pode ser aplicado no solo, melhorando sua estrutura, fertilidade e capacidade de retenção de água. Além disso, a matéria orgânica no solo atua como um sumidouro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Os pagamentos por serviços ambientais podem incentivar os agricultores familiares a adotarem práticas de compostagem.
- **Incentivo à Agricultura Sustentável:** Os pagamentos por serviços ambientais reconhecem o papel dos agricultores na conservação dos ecossistemas. Ao incluir a compostagem como parte desse sistema, estamos incentivando práticas agrícolas mais sustentáveis. Os agricultores familiares podem receber incentivos financeiros para adotar a compostagem como uma estratégia de manejo de resíduos.
- **Valorização do Trabalho Rural:** A compostagem envolve trabalho manual, desde a coleta dos resíduos até o processo de decomposição. Os pagamentos por serviços ambientais podem remunerar os agricultores familiares pelo seu esforço na gestão dos resíduos orgânicos. Isso valoriza o trabalho rural e fortalece a economia local.
- **Educação e Conscientização:** A logística reversa da compostagem requer educação e conscientização tanto dos agricultores quanto da sociedade em geral. Os pagamentos por serviços ambientais podem incluir programas de capacitação e sensibilização sobre a importância da compostagem. Isso cria uma cultura de responsabilidade ambiental e promove a participação ativa dos agricultores familiares.

Em resumo, a integração da compostagem com a agricultura familiar pode ser uma estratégia eficaz para alcançar os objetivos dos pagamentos por serviços ambientais, beneficiando o meio ambiente, os agricultores e a sociedade como um todo.

Quanto a conexão da compostagem com a Política Nacional de Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC (BRASIL, 2009), podemos considerar do processo de compostagem dentro do conceito de "sumidouro de carbono":

Art. 2º Para os fins previstos nesta Lei, entende-se por:

IX - Sumidouro: processo, atividade ou mecanismo que remova da atmosfera gás de efeito estufa, aerossol ou precursor de gás de efeito estufa; e

A PNMC visa a redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, e estabelece metas para diversos setores, como energia, agricultura, pecuária e indústria. De acordo com essa política, a compostagem contribui para:

- Redução das emissões de gases de efeito estufa ao evitar que resíduos orgânicos se decomponham em aterros sanitários. A compostagem reduz as emissões de metano que ocorreriam se esses resíduos fossem depositados em aterros sanitários. O metano (CH_4) é um gás de efeito estufa que, embora invisível e sem cheiro, é muito mais prejudicial do que o dióxido de carbono (CO_2). Este é aproximadamente 28 vezes mais potente como gás de efeito estufa do que o CO_2 ao longo de um período de 100 anos. Isso significa que, em termos de aquecimento global de curto prazo, o metano tem um impacto significativamente maior. Portanto, a compostagem contribui indiretamente para a mitigação das mudanças climáticas.

- Enriquece o solo, melhorando sua capacidade de sequestrar carbono. O composto produzido enriquece o solo com matéria orgânica, nutrientes e microrganismos benéficos. Solos saudáveis têm maior capacidade de sequestrar carbono por meio da fixação de matéria orgânica.

- Estimula práticas agrícolas sustentáveis, como a Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura.

É importante destacar que o Fundo Nacional de Mudanças do Clima (Brasil, 2009) prevê a aplicação dos recursos para atividades que apoia, as cadeias produtivas sustentáveis e para pagamento por serviços ambientais:

Art. 5. Os recursos do FNMC serão aplicados:

§ 4. A aplicação dos recursos poderá ser destinada às seguintes atividades:

X - apoio às cadeias produtivas sustentáveis;

XI - pagamentos por serviços ambientais às comunidades e aos indivíduos cujas atividades comprovadamente contribuam para a estocagem de carbono, atrelada a outros serviços ambientais;

Assim, a compostagem ser conecta com a Política Nacional de Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, inclusive com a previsão de recursos pelo Fundo Nacional de Mudanças do Clima - FNMC.

Verificando as políticas públicas percebe-se que há um problema público de fato, pois existe uma diferença entre a situação atual e uma situação ideal possível. O problema público surge quando o *status quo* (“estado das coisas”) é considerado inadequado, e consiste na diferença entre a situação atual (inadequada) e uma situação futura “ideal”. O *status quo* (ou seja, a “situação atual”) é considerado inadequado e existe a expectativa do alcance de uma situação melhor. Um problema é considerado “público” quando ele é relevante para a coletividade, ou melhor, quando é relevante para uma quantidade significativa de pessoas.

Quanto a relação da compostagem e agricultura urbana, o estudo de Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e TEEB para Agricultura e Alimentação (2024), apontou os benefícios em diferentes experiências analisadas de agricultura urbana e periurbana, várias demonstraram uma ampla diversidade de benefícios gerados pela AUP no Distrito Federal, nas dimensões: humana, social econômica e ambiental.

Na **dimensão humana**, pode ser destacada a (Re)conexão com a natureza e cuidado, seja pela vivência do próprio agricultor, seja pelas pessoas do meio urbano que realizam vivências no meio rural, de caráter pedagógico ou recreativo. Observa-se, nesse sentido, uma relação direta entre a conexão com a natureza, a interação com a flora e a fauna e a sensação de bem-estar-estar. Também merece destaque a relação com a Saúde física, mental e psicológica ao frequentar espaços de AUP. A saúde está presente o acesso a uma alimentação mais saudável, sem agrotóxicos, além do acesso às plantas medicinais, tanto para o produtor como para o consumidor. Um ambiente fresco e com conforto térmico nas cidades também afeta positivamente a saúde e a sensação de bem-estar (Programa Das Nações Unidas Para o Meio Ambiente e Teeb Para Agricultura e Alimentação, 2024).

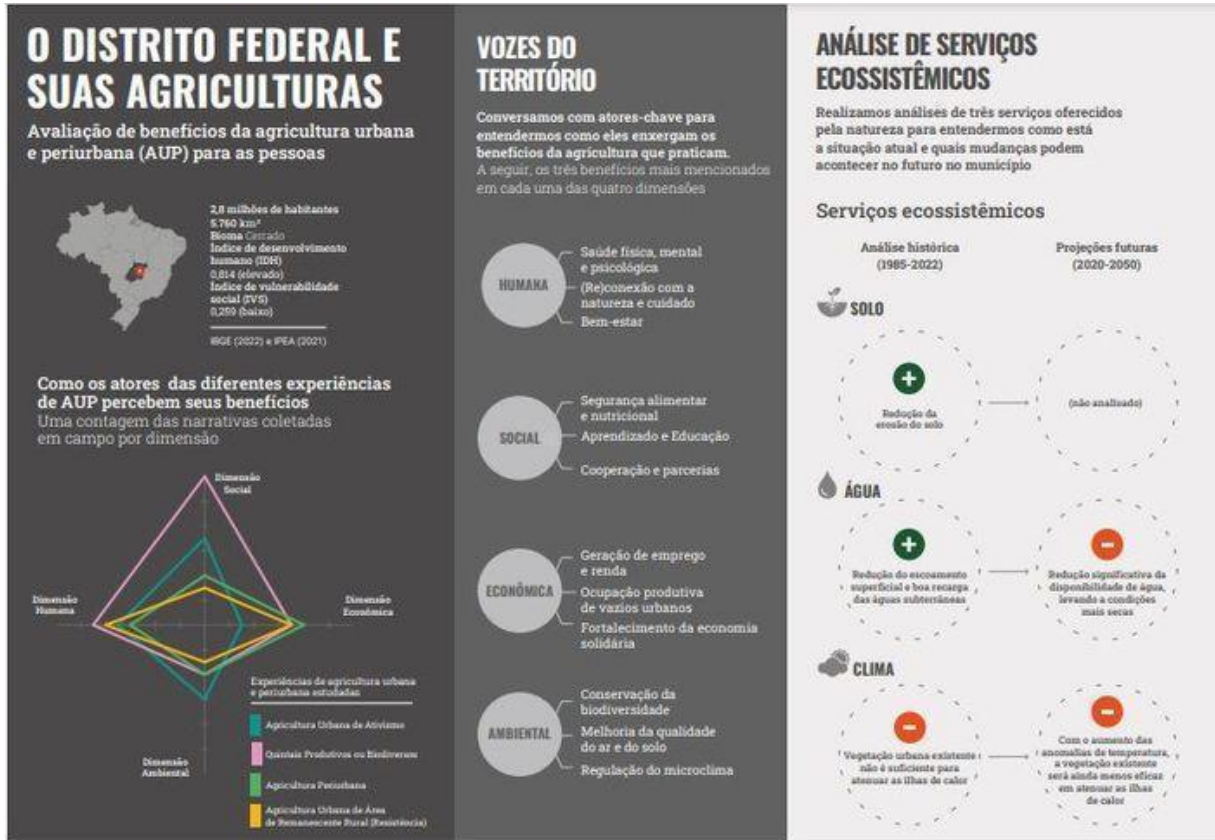
Na **dimensão social**, a Segurança alimentar e nutricional aparece como um dos benefícios mais citados. Muito relacionado ao acesso a alimentação saudável, como mencionado acima, as pessoas percebem a importância da AUP em sua capacidade de proporcionar o acesso aos alimentos, um dos pilares da segurança alimentar. Esse acesso se dá tanto pela proximidade geográfica dos alimentos, como através de políticas públicas de SAN destinadas a atender população em situação de vulnerabilidade social. Também são estratégias as doações, o comércio justo e os laços de solidariedade, que se relacionam com a Coesão comunitária. Este último, é derivado do sentido de pertencimento ao grupo e socialização pelo espaço de Cultura, lazer e recreação

proporcionado pelas iniciativas, além de constituir um lugar de encontro, convívio e lazer intergeracional (Programa Das Nações Unidas Para o Meio Ambiente e Teeb Para Agricultura e Alimentação, 2024).

Já na **dimensão econômica**, a Geração de emprego e renda é a categoria mais mencionada, uma vez que muitas atividades de agricultura, especialmente das tipologias de “Agricultura periurbana” e “Agricultura urbana de remanescente rural (resistência)”, constituem a ocupação dos seus praticantes, gerando renda para quem produz. Ao ocupar os cinturões verdes da cidade, a mesma agricultura que gera renda pode ser considerada uma barreira contra a expansão urbana através da Ocupação produtiva de vazios urbanos. Por fim, observa-se o Fortalecimento da economia solidária quando a comercialização da produção de alimentos se dá em proximidade, seja em feiras livres, varejo local ou do comércio justo, ampliando os laços comunitários (Programa Das Nações Unidas Para o Meio Ambiente e Teeb Para Agricultura e Alimentação, 2024).

Na **dimensão ambiental**, destaca-se a Conservação da biodiversidade. Em virtude do desenvolvimento de diferentes formas e estratos de vegetação, da restauração florestal ou da criação de sistemas agroflorestais verdadeiros refúgios urbanos para a biodiversidade. Outro benefício está na Regulação do microclima pois a paisagem, ao se tornar mais agrícola e/ou agroflorestal, contribui para uma sensação térmica mais amena. Finalmente, a Melhoria da qualidade do ar e solo também é um benefício relevante para as cidades, especialmente no caso do solo urbano compactado que dificulta os processos de infiltração e acaba por favorecer o risco de inundações (Programa Das Nações Unidas Para o Meio Ambiente e Teeb Para Agricultura e Alimentação, 2024).

Figura 1 — O Distrito Federal e suas Agriculturas



Fonte: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e TEEB para Agricultura e Alimentação (2024).

Ainda de acordo com este estudo do PNUMA (2024), a integração entre gestão de resíduos orgânicos e agricultura urbana e periurbana pode potencializar múltiplos benefícios relacionados especialmente ao sequestro de carbono, à redução de resíduos urbanos e à melhoria da qualidade do solo. Nas áreas urbanas, nota-se um destaque nesse tópico pela condição de proximidade que facilita o envolvimento comunitário, favorecendo esquemas descentralizados de incorporação de resíduos orgânicos pela agricultura. Já no ambiente periurbano, faz-se necessária uma estrutura mais robusta e com uma escala mínima de operação a ser considerada pelo gestor local na hora de planejar os serviços. Outro aspecto que pode ser trabalhado nessa dimensão consiste na conscientização da população, especialmente dos beneficiários das iniciativas de AUP (Agricultura Urbana e Periurbana) e de servidores municipais envolvidos nas estruturas nas quais serão realizadas as coletas de resíduos orgânicos.

5.1.4 Compostagem e Aquaponia

A aquaponia tem um potencial significativo de fornecer nutrientes, principalmente nitrogênio, para os processos de compostagem com baixa relação C/N, ou seja, em processos de compostagem de podas, por exemplo.

De maneira complementar, a compostagem também pode beneficiar o sistema aquapônico ao fornecer um destino produtivo para os resíduos sólidos acumulados no tanque de criação — como lamas de fundo e material orgânico sedimentado —, que, quando incorporados ao substrato de compostagem, contribuem com nutrientes adicionais e microrganismos benéficos ao processo de maturação. Essa sinergia estabelece uma relação genuinamente circular: o efluente líquido da aquaponia enriquece o composto de poda, e os resíduos sólidos do sistema aquapônico são compostados e retornam ao solo como fertilizante orgânico, fechando o ciclo de nutrientes entre os dois sistemas e fortalecendo os princípios da economia circular urbana (MULAZZANI et al., 2021; CARBALLEIRA et al., 2021).

Aquaponia é um sistema de produção de animais e plantas em recirculação de água. Desta forma, os nutrientes são transportados para as fases do sistema, maximizando a eficiência no uso de recursos. Entre essas porções, induz-se a formação de um filtro biológico composto principalmente por bactérias nitrificantes, essenciais para o bom funcionamento de todas as reações envolvidas (YILDIZ et al., 2017).

A aquaponia pode ser um sistema de produção de alimentos que permite uma melhor compreensão do uso da água e otimização da água usando diferentes projetos de sistemas hidropônicos para produção de plantas. Os diferentes projetos de sistemas aquapônicos otimizam o uso da água de várias maneiras. Sistemas aquapônicos abertos utilizam plantas cultivadas no solo e empregam resíduos de águas residuais da aquicultura em sistemas de irrigação agrícola, fornecendo também fertilizante orgânico, o que otimiza o uso da água. Já os sistemas aquapônicos de recirculação e desacoplados são mais eficientes devido ao reuso constante das águas residuais da aquicultura e à sua aplicação na nutrição de plantas. Esses sistemas, embora exijam mais materiais plásticos e metálicos para a construção da infraestrutura, são capazes de se adaptar a qualquer espaço e até mesmo a locais sem solo fértil (MARK SCHOOR et al., 2024).

De acordo com Bizon e Soares de Castro (2023) O Brasil, com sua grande população urbana, pode se beneficiar de sistemas aquapônicos para produção de alimentos, dada a sua grande população urbana. O trabalho do autor identificou um número crescente, mas pequeno, de artigos abordando a aquapônica no país, mas

nenhum deles enfocou aspectos de gestão de resíduos. Os resultados da pesquisa indicaram que, embora a maioria dos produtores respondentes tivesse instalações para fins comerciais, informações sobre a geração de resíduos raramente é mantida. Além disso, comenta que as práticas de gestão não são bem definidas e muitos resíduos são descartados ou recebem destino nem sempre adequado. Os resíduos aquapônicos são compostos por materiais que podem ser reciclados ou compostados sem qualquer pré-tratamento especial, o que facilita a gestão. O lodo aquapônico é o fluxo de resíduos mais típico desses sistemas, porém poucos estudos avaliaram alternativas de gerenciamento adequadas. Neste sentido, a fim de avaliar e promover práticas adequadas para a gestão de resíduos aquapônicos em geral - e de lamas aquapônicas em particular -, é muito necessária investigação adicional sobre o seu potencial de recuperação de recursos.

A aquaponia é uma alternativa de produção de alimentos que combina o cultivo de peixes e plantas em recirculação de água. Nesse sistema, os nutrientes são aproveitados ao máximo entre as fases de crescimento. Mundialmente, a aquaponia tem crescido significativamente. A pandemia de COVID-19 agravou os desafios existentes, destacando a urgência de investir em infraestruturas urbanas sustentáveis para fornecer alimentos e recursos de forma resiliente. Grandes cidades, dependentes de insumos externos, reconhecem sua vulnerabilidade e buscam novos arranjos para minimizar limitações (Vilas Boas Dias; Diana Navarro, 2022).

De acordo com a produção de alimentos em sistemas aquapônicos é, de fato, mais sustentável do que a agricultura ou aquicultura tradicionais. Isso abre espaço para inúmeras investigações que busquem manter ou aumentar essa sustentabilidade, bem como otimizar os processos de gerenciamento do sistema.

Nas zonas urbanas, o espaço é limitado. Para viabilizar a produção de alimentos nessas regiões, é crucial equilibrar os elevados custos de produção com as vantagens na distribuição e marketing. Além disso, a aquaponia oferece redução nos custos operacionais de transporte e armazenamento, devido à menor distância até o consumidor. Essa tecnologia, que requer menos água, tem sido estudada como parte do planejamento urbano em várias regiões do mundo (Vilas Boas Dias; Diana Navarro, 2022).

No Brasil, algumas possibilidades surgem como formas de se buscar uma maior sustentabilidade, sobretudo para o setor produtivo, como a agricultura urbana, o aproveitamento de efluentes de aquicultura e a aquaponia. Esta última, busca reduzir o uso de água e possibilitando a produção de alimentos de forma mais sustentável (Hundley, G. C., & Navarro, R. D., 2013).

A aquaponia em escala comercial provavelmente mais popular criada na década de 1980 foi pelo Dr. James Rakocy e sua equipe na University of the Virgin Islands (UVI). A pesquisa mostra que a popularidade do sistema de produção aquapônico tem crescido desde a década de 80, justificando sua crescente importância no que diz respeito à melhoria da segurança alimentar por meio de abordagens inovadoras (et al., 2022).

Uma vantagem única da aquaponia é a produção simultânea de dois produtos - peixes e vegetais - com praticamente a mesma entrada de recursos. Isso, combinado com a possibilidade de produção local em áreas urbanas, leva a uma redução significativa no transporte e nas emissões associadas

De acordo com Victor et al. (2022) são vantagens do sistema de produção aquapônica:

a. Conservação de água - o princípio de recirculação e reutilização de água com alta eficiência é possível pela integração dos peixes e das plantas hidropônicas em um ambiente aquático estável

b. Melhoria da taxa de crescimento e rendimento - foram relatadas experiências em que a produção e o rendimento de abóbora no sistema aquapônico foram cerca de 5 e 11 vezes maiores em desempenho quando comparados a terras irrigadas e terras não irrigadas, respectivamente. Os autores também descobriram que o rendimento de peixes foi 29% e 75% maior usando o sistema aquapônico em comparação aos sistemas de aquicultura recirculatória e estática, respectivamente.

c. Segurança alimentar e eficiência espacial - a aquaponia pode ser configurada em quase qualquer lugar para cultivar peixes e plantações, desde que haja eletricidade e água. Inovadores surgiram com o uso de painéis solares e turbinas eólicas para energia e coletores de chuva para o abastecimento de água. Além disso, utiliza o espaço de forma eficiente. Isso significa que, ao contrário dos espaços abertos horizontais necessários usados no sistema convencional, os agricultores podem trabalhar em espaços menores com canteiros de cultivo projetados para orientação vertical. A consequência disso é que a produção em escala comercial de commodities alimentares pode ser feita em espaços relativamente menores.

d. Menos trabalho manual - funciona sozinho e requer cerca de meia hora de monitoramento ou intervenção humana para mantê-lo funcionando. A maior parte dessa intervenção tem a ver com a alimentação dos peixes e o monitoramento dos parâmetros de qualidade da água.

e. Redução da poluição e consumo de energia - não são necessárias máquinas ou equipamentos pesados de movimentação de terra para cultivar o solo; portanto, a destruição da estrutura do solo e a poluição resultante são eliminadas de uma

só vez usando o sistema aquapônico, inclusive patentearam o que é conhecido como "O primeiro sistema de agricultura comercial hidráulica de baixo carbono do mundo"

f. Controle orgânico de pragas e economia econômica - a maioria dos sistemas aquapônicos é mantida em ambientes fechados ou sombreados, o que reduz pragas e facilita a intervenção orgânica. Isso melhora o crescimento e a produção das plantas. Além disso, o sistema aquapônico reduz custos tradicionais de produção agrícola, tornando-o economicamente atraente.

g. Adaptabilidade às áreas urbanas e possível solução para conflitos entre fazendeiros e pastores - a sociedade de hoje enfrenta grandes desafios devido ao movimento contínuo de indivíduos de áreas rurais para áreas urbanas com motivos que vão desde a procura de emprego, atividades acadêmicas e conveniência geral. Isso criou uma escassez artificial de agricultores rurais, limitando assim a produção agrícola. A aquaponia urbana pode ser uma das maneiras de recuperar o equilíbrio, pois os alimentos podem ser produzidos mesmo em áreas urbanas. Isso está sendo amplamente praticado em muitas cidades do mundo.

Além disso, como a aquaponia não envolve o uso de substâncias nocivas (fertilizantes químicos, antibióticos, pesticidas), os alimentos produzidos podem ser classificados como produtos verdes ou orgânicos (S.G. Alarcón-Silva et al., 2021).

Segundo Victor et al. (2022) aos desafios da aquaponia estão relacionados à:

- a. necessidade de capital inicial
- b. necessidade de energia elétrica estável para operação das máquinas
- c. necessidade de suplementar nutrientes no sistema aquapônico para a plantas, como fosforo e potássio.
- d. necessidade de alcançar o equilíbrio na proporção planta-peixe para uma produção eficaz

De acordo com a pesquisa de Bizon e Soares de Castro (2023) os artigos brasileiros sobre aquaponia abordam alguns pontos importante mencionados abaixo:

- Avaliação de diferentes sistemas e escalas de sistema
- Combinações de espécies vegetais e de peixes
- Comparação de espécies de peixes 'tradicionais' e 'alternativas' e sistemas multitróficos com culturas de camarão e tilápia
- Influência de parâmetros como concentrações de solução hidropônica, densidades de peixes, técnicas de suplementação de nutrientes, regimes de irrigação, salinidade e níveis de proteína bruta em dietas de peixes no desempenho do sistema;

- Estratégias para prevenção de deficiência mineral em plantas incluindo avaliação de fatores e barreiras;
- Monitoramento remoto da qualidade da água

Na pesquisa de Bizon e Soares de Castro (2023) analisou-se 89 sistemas aquapônicos no Brasil, e quando os questionados os sobre fluxos de resíduos, quase metade (47,9%) dos produtores respondentes utiliza para fertilização direta de outras culturas, enquanto 9,4% enviam para áreas de compostagem; também foram citados descarte, recirculação e biodigestão, em ordem decrescente.

Do ponto de vista de Ibrahim et al., (2023) as distintas demandas apresentadas por ambientes urbanos apresentam desafios logísticos frequentemente negligenciados nos estudos atuais. Essas lacunas enfatizam a necessidade de exploração abrangente e pesquisa direcionada para abordar a resiliência da aquaponia em diversos ambientes e fornecer orientação específica para a integração da agricultura urbana. Além disso, a adaptabilidade dos sistemas aquapônicos a diversas condições ambientais, incluindo climas extremos ou padrões climáticos variáveis, continua sendo explorada de forma inadequada. As pesquisas abordando a resiliência da aquaponia em diferentes contextos ambientais são limitadas. Por fim, a agricultura urbana, especialmente a integração de sistemas aquapônicos em ambientes urbanos, carece de orientação diferenciada na literatura existente. As demandas únicas dos ambientes urbanos representam desafios logísticos que os estudos atuais muitas vezes ignoram.

Além disso, a adaptabilidade dos sistemas aquapônicos a várias condições ambientais, abrangendo climas extremos ou padrões climáticos imprevisíveis, continua sendo explorada de forma inadequada nas pesquisas atuais. Estudos limitados abordam a resiliência da aquaponia em diversos contextos ambientais, destacando uma lacuna na compreensão da robustez do sistema sob condições variadas. Além disso, há uma falta de orientação diferenciada na literatura existente sobre agricultura urbana e a integração de sistemas aquapônicos em ambientes urbanos. As distintas demandas apresentadas por ambientes urbanos apresentam desafios logísticos frequentemente negligenciados nos estudos atuais. Essas lacunas enfatizam a necessidade de exploração abrangente e pesquisa direcionada para abordar a resiliência da aquaponia em diversos ambientes e fornecer orientação específica para a integração da agricultura urbana. Por fim, a agricultura urbana, especialmente a integração de sistemas aquapônicos em ambientes urbanos, carece de orientação diferenciada na literatura existente. As demandas únicas dos ambientes urbanos apresentam desafios logísticos que os estudos atuais muitas vezes ignoram (Ibrahim et al., 2023).

5.1.5 Aspectos Técnicos da Aquaponia

De acordo com Ibrahim et al (2023), no futuro, vários aspectos da aquaponia devem ser considerados, incluindo (1) a aplicação de técnicas aquapônicas em áreas secas onde a agricultura tradicional é limitada devido à salinização das águas subterrâneas, (2) a necessidade de um gerenciamento de nutrientes mais abrangente por meio da pesquisa de outros elementos, como fósforo, potássio e distribuição de enxofre na aquaponia, (3) mais pesquisas sobre fatores de influência, nutrientes e comunidades de microrganismos na aquaponia, (4) investigação de alimentos alternativos para peixes e benefícios da policultura, (5) a utilização de energia solar, (6) uma compreensão mais profunda do nível e tipo de competição no mercado, (7) o desenvolvimento de aquaponia de baixo custo, (8) compartilhamento de experiências práticas globalmente, (9) avanços tecnológicos que reduzem os custos de investimento e exigem menos conhecimento técnico, (10) pesquisa e desenvolvimento contínuos que levam a novas variedades de culturas e rendimentos e sustentabilidade otimizados, (11) agricultura urbana, (12) resiliência climática em face das mudanças climáticas, eventos climáticos extremos e escassez de água, (13) examinar a certificação orgânica para produção aquapônica é essencial por reconhecê-la como uma fonte de alimento local saudável e sustentável, independentemente de seu status obrigatório para o crescimento da indústria, e (14) Indústria 4.0 em aquaponia: usando big data, IoT para controle, tecnologia contínua, previsões de manutenção de IA, cortes de custos para acesso e treinamento de trabalhadores qualificados. Isso leva à aquaponia automatizada, orientada por dados e sustentável.

Os vegetais folhosos são ideais para aquaponia devido ao seu rápido crescimento, curto período de crescimento, baixa demanda de nutrientes e tolerância ao nitrogênio. As culturas comumente cultivadas incluem manjeriço, ervas, tomates, alface, folhas verdes para salada, acelga, pimenta, couve e pepinos, escolhidos com base na densidade de peixes e níveis de nutrientes. A absorção de nutrientes varia ao longo dos estágios de crescimento da planta, com uma absorção ótima de P, K⁺, S, Ca²⁺ e Mg²⁺ em pHs de 6,0 a 8,0. Outros nutrientes como Fe²⁺, Mn²⁺, B³⁺, Cu²⁺ e Zn²⁺ são melhor absorvidos em um pH abaixo de 6,0. As folhas verdes requerem níveis mais altos de nitrato do que os vegetais frutíferos, e áreas maiores de raízes aumentam a absorção de nitrato. As culturas com flores são mais valiosas, mas têm maiores

necessidades de nutrientes e ciclos de crescimento mais longos, representando desafios na aquaponia (Ibrahim et al., 2023).

De acordo com Ibrahim et al. (2023) a tilápia do Nilo é amplamente utilizada e considerada excelente para aquaponia devido à sua adaptabilidade, seguida pela carpa e pelo bagre africano. A tilápia do Nilo pode tolerar altos níveis de nitrito de até sobreviver em níveis de oxigênio dissolvido, permitindo maiores densidades de estocagem para atender às necessidades de nutrientes das plantas. A ração para peixes constitui 70% dos custos da aquicultura, mas apenas 20–30% do conteúdo de nitrogênio (N) é consumido pelos peixes, enquanto 70–80% são liberado na água como resíduo ou utilizado na aquaponia. A farinha de peixe, apesar de ser rica em aminoácidos e fósforo, carece de micronutrientes essenciais e potássio para o crescimento das plantas. A policultura, envolvendo diferentes espécies aquáticas, mostra potencial para aumentar o crescimento das plantas na aquaponia, mas requer mais pesquisas. Os impactos da excreção de diferentes espécies de peixes nos níveis de nutrientes em soluções aquapônicas e nos rendimentos das plantas permanecem incertos. Explorar rações alternativas para peixes que gerem águas residuais com níveis mais altos de potássio (K) e magnésio (Mg) e maximizar a conversão de nutrientes em biomassa vegetal requer investigação adicional.

A aquaponia tem um potencial significativo de fornecer nutrientes, principalmente nitrogênio, para os processos de compostagem com baixa relação C/N, ou seja, em processos de compostagem de podas, por exemplo.

Em seu estudo, Peng Chen et al. (2021) , avaliou o desempenho de um sistema aquapônico de camarão (*Litopenaeus vannamei*) e manjerição (*Ocimum basilicum*) em termos de qualidade da água, uso da água e remoção de nutrientes. Este sistema aquapônico de manjerição e camarão produziu de 4–5 kg de manjerição por kg de camarão. Este autor teve como destaque que a aquaponia camarão-manjerição:

- melhora a eficiência do uso da água de 3 a 4 vezes mais do que a monocultura de camarão;
- melhora a qualidade da água reduzindo amônia, nitrito, N total e P total;
- aumenta a eficiência do uso de N e P de 4 a 7 vezes em comparação à monocultura de camarão;
- maximiza a produção por unidade de água e nutrientes.

De acordo com Victor et al. (2022), em seu artigo de revisão bibliográfica, adotou-se como proporção de produção de peixes para plantas calculada como sendo 15–42 g

de ração para peixes/m² de área de cultivo de plantas. A produção estima-se que para cada 0,5 kg de peixe, 6,8 a 11,3 kg de vegetais podem ser produzidos.

Do ponto de vista ambiental, a aquaponia apresenta uma diminuição do potencial de aquecimento global (GWP) e da escassez de recursos fósseis. Há também uma redução em várias outras categorias de impacto ambiental, especialmente aquelas relacionadas à energia e água. Outro benefício importante é o aumento da produtividade, com a possibilidade de um rendimento até 25% maior em algumas culturas, como a alface (Oliver Körner et al., 2021).

O cultivo aquapônico apresenta particularidades importantes relacionadas ao pH e à disponibilidade de nutrientes. Embora o pH ideal para peixes e bactérias seja superior a 7,0, este nível pode comprometer a disponibilidade de diversos nutrientes essenciais como Fe, Mn, B, Zn e Cu, que têm sua disponibilidade reduzida significativamente em pH acima deste valor (Duarte et al., 2023).

Interessantemente, as culturas aquapônicas que apresentaram resultados positivos mesmo com pH em torno de 7,2, demonstrando boa disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas. Enfatiza-se a importância crucial da maturação do sistema aquapônico, que deve ser de no mínimo 30 dias. Os resultados obtidos nas culturas com PH em torno de 7,2 foram particularmente expressivos, apresentando não apenas um suprimento adequado de macro e micronutrientes, mas também um desempenho equiparável ao sistema hidropônico em diversos aspectos, incluindo diâmetro da cabeça, número de folhas e peso seco (Duarte et al., 2023).

Em condições de pH alcalino, observou-se um aumento na atividade das bactérias nitrificantes, além de uma maior concentração de Ca, que pode interferir na absorção de outros nutrientes como Mg e Mn. Para estabelecer um sistema aquapônico bem-sucedido, é indicado três requisitos fundamentais: garantir um período de maturação mínimo de 30 dias, realizar a suplementação adequada de micronutrientes através de fertilizante mineral, e manter um controle cuidadoso da interação entre a suplementação mineral, o teor de proteína na ração e a densidade de peixes no sistema (Duarte et al., 2023).

5.1.6 Desafios da Aquaponia

Segundo Peng Chen et al. (2020), a implementação de sistemas aquapônicos exige atenção a pontos críticos de ordem energética, nutricional e operacional. O consumo de eletricidade para aquecimento e iluminação de estufas foi identificado como

o principal impacto ambiental, com a produção no inverno gerando mais que o dobro do impacto em relação ao verão, o que torna o uso de fontes renováveis uma estratégia prioritária. A ração dos peixes representa o segundo maior contribuinte ambiental, sendo recomendada a exploração de alternativas mais sustentáveis.

O manejo adequado da água, o controle de pH e a seleção de culturas de alto valor também são fatores determinantes para o desempenho do sistema. O equilíbrio entre a produção de peixes e plantas é essencial para maximizar a eficiência no uso de nutrientes e reduzir a dependência de insumos externos. Os autores concluem que a otimização contínua do sistema, aliada à escolha estratégica de localização e clima, é fundamental para melhorar o desempenho ambiental e econômico da aquaponia.

De acordo com o artigo de A. Reyes Yanes et al. (2020), os parâmetros mais significativos detectados para um sistema de aquaponia são cruciais para o sucesso da operação. O pH da água é um fator fundamental, devendo ser mantido entre 6,5-7,0 para equilibrar as necessidades dos peixes, plantas e bactérias nitrificantes. A temperatura da água também desempenha um papel vital, com uma faixa ideal entre 17-30°C, embora possa variar ligeiramente dependendo das espécies de peixes e plantas cultivadas. O oxigênio dissolvido é outro parâmetro crítico, com níveis acima de 4 mg/L sendo essenciais para a saúde dos peixes, plantas e bactérias.

Os níveis de compostos nitrogenados - amônia, nitrito e nitrato - são particularmente importantes de monitorar, pois são fundamentais para o ciclo de nutrientes no sistema. A condutividade elétrica da água é outro indicador valioso, fornecendo informações sobre a concentração de nutrientes dissolvidos. O nível de água no sistema também é um fator crucial, pois afeta diretamente a densidade de peixes e o fornecimento de água para as plantas (A. Reyes Yanes et al., 2020).

Para alcançar um sistema de aquaponia "perfeito", é essencial implementar um monitoramento constante desses parâmetros da água, utilizando sensores confiáveis. Um sistema de controle automatizado é altamente recomendado para manter esses parâmetros dentro das faixas ideais. A filtração mecânica e biológica eficiente é indispensável para remover resíduos sólidos e converter amônia em nitrato, mantendo a qualidade da água (A. Reyes Yanes et al., 2020).

Manter um equilíbrio adequado entre a população de peixes e a quantidade de plantas é crucial para assegurar um ciclo de nutrientes eficiente. A aeração adequada, tanto para os peixes quanto para as raízes das plantas, não pode ser negligenciada. O controle da iluminação é outro fator importante para otimizar o crescimento das plantas (A. Reyes Yanes et al., 2020).

Para garantir a estabilidade do sistema, é aconselhável implementar sistemas de backup de energia e água para evitar falhas críticas. A manutenção regular, incluindo limpeza e verificação de equipamentos, é fundamental para o funcionamento contínuo e eficiente do sistema (A. Reyes Yanes et al., 2020).

O uso de tecnologias IoT (Internet das Coisas) para monitoramento remoto e controle do sistema pode aumentar significativamente a eficiência e a facilidade de gerenciamento. Além disso, a implementação de sistemas inteligentes ou de IA para previsão e otimização dos parâmetros do sistema representa o estado da arte em termos de gerenciamento de aquaponia (A. Reyes Yanes et al., 2020).

É importante lembrar que a "perfeição" em aquaponia envolve um equilíbrio delicado entre vários fatores e pode requerer ajustes contínuos baseados nas necessidades específicas das espécies de peixes e plantas que estão sendo cultivadas. A atenção constante e a disposição para fazer ajustes conforme necessário são características essenciais para o sucesso de um sistema de aquaponia (A. Reyes Yanes et al., 2020).

O artigo de Yilong Hao et al. (2020) apresenta uma análise abrangente do cenário mundial de pesquisa em aquaponia, baseada em uma revisão sistemática de 513 publicações entre 2000 e 2019. Os principais focos de pesquisa identificados são os componentes do sistema, o tratamento de águas residuais, o manejo de nutrientes e a produção do sistema. O estudo destaca que os EUA, Europa (especialmente Holanda, Alemanha, Itália e Suíça) e China são os principais centros de pesquisa, cada um com ênfases diferentes em suas abordagens.

As tendências observadas mostram que a pesquisa evoluiu de componentes internos para características externas do sistema, e a identidade da aquaponia mudou de puramente produtiva para múltiplos papéis. Os desafios mais significativos identificados estão relacionados ao manejo (prevenção de doenças, estratégias de cultivo) e ao reconhecimento de mercado. Para o futuro, o estudo aponta a necessidade de mais pesquisas sobre construção de sistemas, manejo de nutrientes e estrutura da comunidade microbiana. Além disso, há um apelo para integrar a aquaponia no conceito de infraestrutura verde (Yilong Hao et al., 2020).

Quando Yilong Hao et al. (2020) menciona que "a identidade aquapônica na produção urbana e na vida precisa ser esclarecida dentro da nova estrutura conceitual para obter reconhecimento de mercado", ele está abordando uma questão fundamental para o futuro da aquaponia. Atualmente, a aquaponia sofre de uma identidade indefinida no contexto urbano, o que significa que não há um entendimento comum sobre qual é

exatamente o seu papel nas cidades modernas. Esta falta de clareza está se tornando um obstáculo significativo para sua ampla adoção e aceitação.

É necessário posicionar a aquaponia dentro de um quadro conceitual mais amplo e contemporâneo. Isso pode envolver a integração da aquaponia em conceitos como agricultura urbana sustentável, economia circular ou sistemas alimentares resilientes. Essa contextualização é crucial porque a falta de uma identidade clara está dificultando a aceitação e adoção generalizada da aquaponia. Para que a aquaponia seja mais amplamente aceita e adotada, é necessário que o mercado - incluindo consumidores, investidores e legisladores - entenda claramente seu valor e papel (Yilong Hao et al., 2020).

Yilong Hao et al. (2020) argumenta que a aquaponia precisa ser reposicionada conceitualmente: mais do que uma técnica de produção de alimentos, ela deve ser compreendida como parte integrante da infraestrutura verde urbana, com potencial para contribuir com segurança alimentar, educação ambiental e design urbano. Essa visão holística ampliaria sua relevância para diferentes atores sociais e abriria novas oportunidades de mercado e apoio político.

Para que isso se concretize, os autores defendem a necessidade de uma nova estrutura conceitual que redefina claramente a identidade da aquaponia no contexto urbano. Essa ressignificação seria um passo crucial para transformá-la de uma técnica de nicho em uma solução integrada para os desafios das cidades, garantindo maior reconhecimento público e adoção em escala.

Desafios subjacentes a fatores socioecológicos, técnicos e econômicos sustentáveis relativos à aquaponia são discutidos para demonstrar a necessidade e os meios de investir extensivamente em mais pesquisa, desenvolvimento e educação no setor de aquaponia. Levar esses fatores em consideração é necessário porque uma perspectiva puramente financeira enfrenta restrições significativas, principalmente em termos de escassez de recursos naturais e suas consequências econômicas de longo prazo. O desenvolvimento comercial de sistemas aquapônicos social, ecológica e ambientalmente sustentáveis enfrenta vários desafios técnicos que precisam ser abordados mais detalhadamente: (1) melhor solubilização e recuperação de nutrientes para um melhor uso da entrada de nutrientes e redução da adição extra mineral, por exemplo, reciclagem de fósforo; (2) manejo adaptado de pragas; (3) reduzir o consumo de água em alto grau, limitando a necessidade de troca de água; (4) uso de fontes alternativas de energia para áreas quentes/frias e áridas (por exemplo, calor residual de CHP, calor geotérmico, etc.); e (5) métodos inovadores de estabilização de pH pela

implementação de reatores de leito de cal fluidizado que foram usados com sucesso em águas naturais (Goddek et al., 2015).

Todos os fatores mencionados acima exigem atenção adicional, porque alguns parâmetros de produção ainda precisam ser determinados e otimizados para preparar a aquaponia para uso comercial, pois alguns componentes e suas interações ainda não estão tecnicamente maduros. Isso não pode ser suficientemente alcançado sem um foco maior na combinação do conhecimento existente dos diferentes campos envolvidos dentro de uma estrutura científica e internacional. Esses aspectos são importantes, pois a tecnologia alinhada comercialmente não deve ser restringida por certas condições externas. Em vez disso, os sistemas a serem desenvolvidos devem ser universalmente aplicáveis, o que implica sistemas de produção econômicos em recursos (ou seja, economizadores de recursos) que podem ser executados em áreas áridas, quentes, frias e urbanas ou qualquer combinação delas (Goddek et al., 2015).

O custo da energia e os preços dos fertilizantes estão constantemente aumentando e as políticas governamentais incentivam a redução da poluição emitida (por exemplo, esquemas de incentivos fiscais), portanto, espera-se que esse benefício de margem de custo da aquaponia aumente. Embora a maior margem de lucro financeiro tenha sido demonstrada com vegetais folhosos, ainda é necessário determinar o propósito e a escala dos respectivos sistemas antes de construí-los; as necessidades em um nível microeconômico em termos de autossuficiência alimentar ou fornecimento local de alimentos podem diferir de abordagens orientadas ao lucro e de país para país (Goddek et al., 2015).

6 REFERÊNCIAS

- A. REYES YANES, *et al.* **Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems**. Journal of Cleaner Production. Science Direct, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>. Acesso em: 13 out. 2024.
- ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025**. São Paulo: ABREMA, dez. 2025. Disponível em: www.abrema.org.br. Acesso em: 26 fev. 2026.
- ABREU, M.J. et al. **As experiências de compostagem doméstica como subsídio à gestão municipal de resíduos orgânicos**. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 14, n. 31, p. 56-77, 2018. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/7273>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- Álvarez-Alonso, C.; Pérez-Murcia, M.D.; Sánchez-Méndez, S.; Martínez-Sabater, E.; Irigoyen, I.; López, M.; Nogués, I.; Paredes, C.; Orden, L.; García-Ránde, A.; et al. **. Municipal Solid Waste Management in a Decentralized Composting Scenario: Assessment of the Process Reproducibility and Quality of the Obtained Composts**. Agronomy. 2024. 14,54 p. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010054>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- AQUINO, A.M.; ALMEIDA, D.L.; SILVA, V.F. **Utilização de minhocas na estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem**. Comunicado Técnico da Embrapa Agrobiologia, n. 8, p. 1-6, 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/624754>. Acesso em: 12 jul. 2024.
- BERNAL, M.P.; ALBURQUERQUE, J.A.; MORAL, R. **Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review**. Bioresource Technology, v. 100, n. 22, p. 5444-5453, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- BIZON, Larissa ;SOARES DE CASTRO, Marco Aurélio . **AQUAPONICS IN BRAZIL: REVIEW AND SURVEY ON WASTE MANAGEMENT PRACTICES**. 2023. 16 p. Disponível em: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.2.83120>. Acesso em: 6 abr. 2025.

BOECHAT, C.L.; SANTOS, J.A.G.; ACCIOLY, A.M.A. **Net mineralization nitrogen and soil chemical changes with application of organic wastes with 'Fermented Bokashi Compost'**. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 35, n. 2, p. 257-264, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/ppg7kB3phYLFSc8fPTHvMZR/?lang=en>. Acesso em: 15 jul. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 481, de 3 de outubro de 2017. **Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, 04 out. 2017, Seção 1, p. 51. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19306260/do1-2017-10-04-resolucao-n-481-de-3-de-outubro-de-2017-19306216. Acesso em: 5 jul. 2024.

BRASIL. **Fundo Nacional sobre Mudança do Clima n. 12.114**, de 08 de dezembro de 2009. Diário Oficial da União, Brasília, 29 de dezembro de 2009, ano 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12114.htm. Acesso em: 8 jun. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 481** - estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências, de 02 de outubro de 2017. **Diário Oficial da União**.

BRASIL. **Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC** e dá outras providências, de 28 de dezembro de 2009. Diário Oficial da União, Brasília, ano 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 8 jun. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Lei n. 11.326, de 23 de junho de 2006**. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais.. **Diário Oficial da União**, Brasília, 24 de junho de 2006, ano 2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11326.htm. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Lei n. 14.119, de 18 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis n os 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de

1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**, Brasília, 19 de janeiro de 2021, ano 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14119.htm. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Lei n. 12.305, de 01 de agosto de 2016. Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, 02 de agosto de 2016, ano 2016. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 28 abr. 2024.

BIZON, Larissa; SOARES DE CASTRO, Marco Aurélio . **AQUAPONICS IN BRAZIL: REVIEW AND SURVEY ON WASTE MANAGEMENT PRACTICES**. 2023. 16 p. Disponível em: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.2.83120>. Acesso em: 6 abr. 2025.

CARBALLEIRA, C. ET AL. TOWARDS **Environmental Sustainability in Marine Finfish Aquaculture**. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, p. 666662, 21 ABR. 2021. . :[HTTPS://WWW.FRONTIERSIN.ORG/JOURNALS/MARINESCIENCE/ARTICLES/10.3389/FMARS.2021.666662/FULL](https://www.frontiersin.org/journals/marinescience/articles/10.3389/fmars.2021.666662/full). ACESSO EM: 5 JUN. 2025.

DA SILVA, Ágatha Transfeld; DA SILVA, Samantha Transfeld. **Panorama da agricultura orgânica no Brasil. Segurança Alimentar e Nutricional**. 2016, p. 1031-1040. Disponível em: . Acesso em: 6 abr. 2025.]

DUARTE, Eglerson *et al.* **Nutrients in lettuce production in aquaponics with tilapia fish compared to that with hydroponics**. *Rev. Caatinga* 36. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n103rc>. Acesso em: 24 nov. 2024.

EPSTEIN, E. Industrial Composting: **Environmental Engineering and Facilities Management**. Boca Raton: CRC Press, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b10726>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ERMOLAEV, E.; SUNDBERG, C.; PELL, M.; SMÅRS, S.; JÖNSSON, H. **Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from food and garden waste composting**. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, p. 118165, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118165>. Acesso em: 11 mar. 202 BOECHAT.

FORNAZIER, Armando; DARNET, Laura Angélica Ferreira; BARRETO, Cristiane Gomes. **Nexo Água-Energia-Alimento e a Agroecologia: Reflexões, Experiências e Resultados de Pesquisa**. 2022.

GODDEK, Simon *et al.* **Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics**. Sustainability . <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/4/4199>, 2015. 7(4) p. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su7044199>. Acesso em: 24 nov. 2024.

HUNDLEY, G. C., & NAVARRO, R. D.. Aquaponia: a Integração entre Piscicultura e a Hidroponia.. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, p. 52-61, 2013.

INÁCIO, C. de T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 156 p. ISBN 978-85-85864-31-6. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/663578/compostagem-ciencia-e-pratica-para-a-gestao-de-residuos-organicos>. Acesso em: 11 mar. 2024.

IBRAHIM, Lubna *et al.* **Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency**. Water . <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/24/4310>, 2023, p. 15-24. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15244310>. Acesso em: 24 nov. 2024.

INSAM, H.; DE BERTOLDI, M. Microbiology of the composting process. In: DIAZ, L.F. *et al.* (Eds.). **Compost Science and Technology**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 25-48. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1478-7482\(07\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S1478-7482(07)80006-6). Acesso em: 11 jul. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL (IPEDF Codeplan). **Caracterização da agricultura urbana e periurbana do Distrito Federal. Brasília, DF: IPEDF Codeplan, 2023.** Disponível em: <https://ipe.df.gov.br/documents/d/ipedf/relatorio-caracterizacao-da-agricultura-urbana-e-periurbana-do-distrito-federal-pdf>. Acesso em: 26 fev. 2026.

KIEHL, E.J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 6. ed. Piracicaba: E. J. Kiehl, 2012. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001004271>. Acesso em: 9 jul. 2024.

LOURENÇO, N.M.G.; COELHO, S.I.D. **Vermicompostagem nas escolas: manual prático para o professor**. Palmela: Câmara Municipal de Palmela, 2012. Disponível em: <https://www.cm->

palmela.pt/uploads/writer_file/document/13690/Manual_Vermicompostagem.pdf.
Acesso em: 12 jul. 2024.

Lubna A. Ibrahim *et al.* **Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency.** 2023. 15 p. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15244310>. Acesso em: 6 abr. 2025.

Mark Schoor *et al.* **Horticultural Irrigation Systems and Aquacultural Water Usage: A Perspective for the Use of Aquaponics to Generate a Sustainable Water Footprint.** 2024. 14 p. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14060925>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MAZOYER, Marcel; ROUDART, Laurence. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**, f. 284. 2009. 567 p.

MULAZZANI, L. *et al.* **Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth. Reviews in Aquaculture,** 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23308249.2021.1897520>. Acesso em: 5 jun. 2025.

Oliver Körner *et al.* **Environmental impact assessment of local decoupled multi-loop aquaponics in an urban context.** Journal of Cleaner Production. Science Direct, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127735>. Acesso em: 13 out. 2024.

ONWOSI, C.O. *et al.* **Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects.** Journal of Environmental Management, v. 190, p. 140-157, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>. Acesso em: 9 jul. 2024.

Peng Chen *et al.* **Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States.** Journal of Cleaner Production. Science Direct, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122888>. Acesso em: 13 out. 2024.

PEREIRA NETO, J.T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo.** Viçosa: UFV, 2011.

PRIMAVESI, A. **Manual do solo vivo: solo sadio, planta sadia, ser humano sadio**. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2016.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE E TEEB PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. **Cidades e suas agriculturas [recurso eletrônico] : avaliação de benefícios da agricultura urbana e periurbana para as pessoas : sumário executivo do Distrito Federal**. Agricultura na Cidade. São Paulo, 2024. 56 p. Disponível em: <https://agriculturanacidade.com.br/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

RYCKEBOER, J. et al. Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. *Journal of Applied Microbiology*, v. 94, n. 1, p. 127-137, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01800.x>. Acesso em: 11 jul. 2024.

S.G. Alarcón-Silva *et al.* **Water quality, water usage, nutrient use efficiency and growth of shrimp *Litopenaeus vannamei* in an integrated aquaponic system with basil *Ocimum basilicum***. *Aquaculture*. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737023>. Acesso em: 6 out. 2024.

Serviço de Limpeza Urbana - SLU. **Relatório anual 2023. Serviço de Limpeza Urbana 2023**. Brasília: Serviço de Limpeza Urbana – SLU, 2023. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/documents/d/slu/relatorio-anual-slu-2023> . Acesso em: 05 de maio 2024.

SOUZA, J.L.; RESENDE, P. **Manual de horticultura orgânica**. 3. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2014.

THEODORO, Suzi.H; LEONARDOS, Othon.H. **The unsustainable sustainability**: Anais da Academia Brasileira de Ciências. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/XmXs43QhT3DKmY9qkxHwkcg/?lang=en> . Acesso em: 6 abr. 2025.

VALENTE, B.S. et al. **Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos**. *Archivos de Zootecnia*, v. 58, p. 59-85, 2016. Disponível em: <https://www.uco.es/ucopress/az/index.php/az/article/view/4924>. Acesso em: 9 jul. 2024.

Victor T.O. *et al.* **Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption**. *Food Science & Nutrition*. 2022, p. 1155-1599. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3154>. Acesso em: 6 out. 2024.

VIEIRA, Victor Hugo Argentino de Moraes; SANTOS, Laís Ferreira dos. **Novos modelos de compostagem nas cidades: integrando reciclagem, agricultura e moradia**. 1. ed. São Paulo: Instituto Pólis, 2023. Disponível em: <https://polis.org.br/projeto/novos-modelos-de-compostagem-nas-cidades/>. Acesso em: 7 jul. 2024.

VILAS BOAS DIAS, Thaís ; DIANA NAVARRO, Rodrigo. **Uso da Aquaponia como Ferramenta para o Ensino em Ciências**. Brasília, 2022. 102 p Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade de Brasília.

YILDIZ, H. Y., ROBAINA, L., PIRHONEN, J., MENTE, E., DOMÍNGUEZ, D., & PARISI, G. **Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review**. *Water*. 2017. 17 p. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/1/13>. Acesso em: 18 jul. 2024.

YILONG HAO, *et al.* **States, Trends, and Future of Aquaponics Research**. *Sustainability*. MDPI, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12187783>. Acesso em: 13 out. 2024.

IBRAHIM, L.A.; Shaghaleh, H.; El-Kassar, G.M.; Abu-Hashim, M.; Elsadek, E.A.; Alhaj Hamoud, Y. **Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency**. *Water* **2023**, *15*, 4310. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15244310> . Acesso em: 20 fev. 2024.

Capítulo 1

ECONOMIA CIRCULAR NA PRÁTICA: Compostagem Descentralizada e Aquaponia no contexto urbano do DF

DAHIANA OLIVEIRA RIBEIRO RODRIGUES¹

JADER GALBA BUSATO²

RODRIGO DIANA NAVARRO³

RESUMO

A gestão sustentável de resíduos orgânicos urbanos representa um desafio crescente para as cidades contemporâneas, especialmente considerando que aproximadamente 55% dos resíduos sólidos urbanos são compostos por matéria orgânica. Este estudo investiga a viabilidade da integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem no contexto urbano do Distrito Federal, com foco específico no aproveitamento da água residuária rica em nitrogênio proveniente da aquaponia para a compostagem de podas urbanas. Por meio de uma revisão sistemática da literatura, analisaram-se 63 artigos científicos publicados entre 2000 e 2024, selecionados a partir de uma amostra inicial de 2.940 publicações. Os resultados revelam uma evolução significativa na concepção de sistemas aquapônicos urbanos, transitando de abordagens puramente produtivas para soluções multifuncionais integradas. Identificou-se que aproximadamente 47,9% dos produtores aquapônicos já utilizam alguma forma de integração com outros sistemas de produção, embora de maneira não otimizada. A emergência do conceito de "Aquaponia 4.0", caracterizada pela incorporação de tecnologias IoT e automação, demonstra o potencial de otimização destes sistemas. Conclui-se que a integração entre aquaponia e compostagem apresenta oportunidades significativas para o fechamento de ciclos de nutrientes em ambientes urbanos, embora existam desafios técnicos e operacionais que precisam ser superados através de pesquisa adicional e desenvolvimento tecnológico.

Palavras-chave: compostagem, aquaponia, economia circular, cidades sustentáveis, agricultura urbana.

ABSTRACT

The sustainable management of urban organic waste represents a growing challenge for contemporary cities, especially considering that approximately 55% of urban solid waste consists of organic matter. This study investigates the feasibility of integrating aquaponic systems and composting processes in the urban context of the Federal District, Brazil, with a specific focus on utilizing nitrogen-rich wastewater from aquaponics for urban pruning composting. Through a systematic literature review, 63 scientific articles published between 2000 and 2024 were analyzed, selected from an initial sample of 2,940 publications. The results reveal a significant evolution in the design of urban

¹UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

aquaponic systems, transitioning from purely productive approaches to integrated multifunctional solutions. It was identified that approximately 47.9% of aquaponic producers already use some form of integration with other production systems, although not in an optimized manner. The emergence of the "Aquaponics 4.0" concept, characterized by the incorporation of IoT technologies and automation, demonstrates the potential for optimization of these systems. The study concludes that the integration between aquaponics and composting presents significant opportunities for closing nutrient cycles in urban environments, although there are technical and operational challenges that need to be overcome through additional research and technological development.

Keywords: composting, aquaponics, circular economy, sustainable cities, urban agriculture.

Data de Aprovação: Brasília, 10 de fevereiro de 2026

Data de Submissão: Brasília, 10 de março de 2026

Disponibilidade: colocar endereço eletrônico do artigo, DOI ou outras inf.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos representa um dos maiores desafios contemporâneos, com projeções que indicam um crescimento expressivo na geração de resíduos nas próximas décadas. Deste montante, aproximadamente 55% corresponde à fração orgânica, cuja gestão tradicional não apenas demanda recursos financeiros significativos, como também gera impactos ambientais consideráveis. Neste contexto, a recuperação dos nutrientes presentes nesses resíduos emerge como uma estratégia fundamental para reduzir a dependência de fertilizantes minerais, cuja extração intensifica a exploração de recursos naturais não renováveis.

A implementação de práticas inovadoras na gestão de resíduos orgânicos, alinhadas aos princípios da economia circular, apresenta oportunidades para transformar o que tradicionalmente seria descartado em recursos valiosos para a sociedade. No Distrito Federal (DF), observa-se um movimento crescente nesta direção, com empresas de pequeno e médio porte já operando na conversão de resíduos em compostos orgânicos. Paralelamente, iniciativas descentralizadas em condomínios e instituições de ensino têm demonstrado o potencial de Brasília em se tornar uma referência nacional em práticas de economia circular.

Neste cenário, emerge uma possibilidade promissora: a integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem, especificamente no aproveitamento da água residuária rica em nitrogênio proveniente da aquaponia para a rega de

compostagem de podas urbanas. Esta abordagem apresenta particular relevância considerando que o material de poda, embora rico em carbono, apresenta deficiência em nitrogênio. A integração destes sistemas pode representar um avanço significativo no fechamento de ciclos de nutrientes, fortalecendo a implementação de princípios de economia circular no contexto urbano.

A sinergia entre aquaponia e compostagem se estabelece de maneira complementar: enquanto a compostagem de poda produz um condicionador de solo com elevado teor de carbono, a incorporação da água residuária da aquaponia, rica em nitrogênio, pode enriquecer nutricionalmente o composto final, potencializando suas propriedades como fertilizante orgânico.

Para investigar esta hipótese e avaliar a viabilidade do uso da água residuária da aquaponia como fonte de nitrogênio na compostagem de podas urbanas, realizou-se uma revisão sistemática da literatura. O presente estudo busca responder à seguinte questão central: "Em que medida a água residuária da aquaponia pode suprir as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas urbanas, resultando em um composto orgânico nutricionalmente equilibrado?"

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão sistemática da literatura, com o propósito de investigar a viabilidade da **integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem**, focando especificamente no potencial da água residuária aquapônica como fonte de nitrogênio para a compostagem de podas urbanas. A investigação partiu da premissa de que os sistemas aquapônicos podem fornecer nutrientes, principalmente nitrogênio, para processos de compostagem que apresentam baixa relação C/N, característica típica da compostagem de podas urbanas.

O protocolo de revisão sistemática foi estruturado a partir da seguinte questão norteadora: "Em que medida a água residuária da aquaponia pode suprir as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas urbanas, resultando em um composto orgânico nutricionalmente equilibrado?". Para responder a esta questão, foram realizadas buscas nas bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct e Google Scholar, utilizando como string de busca "composting AND aquaponics". O período de análise compreendeu publicações de 2000 a 2024, considerando apenas artigos científicos e artigos de revisão publicados em inglês.

O processo de seleção dos artigos seguiu três etapas sequenciais: inicialmente, realizou-se uma triagem por título para avaliação preliminar da relevância dos estudos; em seguida, procedeu-se à análise dos resumos para refinamento da seleção com base nos objetivos da pesquisa; por fim, executou-se a leitura integral dos artigos selecionados. Como critérios de elegibilidade, foram incluídos estudos que abordavam sistemas aquapônicos, gestão de nutrientes e/ou integração com processos de compostagem, excluindo-se artigos focados exclusivamente em compostagem com esterco animal.

A busca inicial nas bases de dados, realizada em 15 de setembro de 2024, resultou em 2.940 artigos, sendo 903 da Web of Science e 2.037 do Google Scholar. Após a remoção de duplicatas, o conjunto foi reduzido para 2.793 artigos. Aplicando-se o critério de relevância baseado em citações, que estabeleceu um mínimo de 30 citações por artigo, chegou-se a um conjunto de 135 artigos para análise detalhada.

A análise dos dados focou em aspectos como características dos sistemas aquapônicos, gestão de nutrientes, potencial de integração com processos de compostagem, aspectos técnicos e operacionais, e viabilidade da aplicação em contexto urbano. A síntese dos dados foi conduzida de forma qualitativa, buscando identificar padrões, tendências e lacunas no conhecimento existente sobre a integração entre aquaponia e compostagem. Esta abordagem permitiu uma compreensão abrangente do estado atual da pesquisa nesta área e das possibilidades de desenvolvimento de sistemas integrados de aquaponia e compostagem em ambientes urbanos.

Para sistematizar a análise dos artigos selecionados, foram estabelecidas cinco categorias analíticas principais: (1) menção ao potencial de uso da água residuária da aquaponia; (2) discussão específica sobre o uso da água residuária em compostagem; (3) abordagem da integração com compostagem de poda urbana; (4) relação com economia circular e cidades sustentáveis; e (5) artigos que não abordam o uso da água residuária. Esta categorização permitiu quantificar as diferentes abordagens presentes na literatura e identificar lacunas específicas no conhecimento existente, particularmente no que se refere à integração entre sistemas aquapônicos e processos de compostagem em contextos urbanos.

Em resumo, a **revisão sistemática** para validação da conexão entre compostagem e aquaponia, de acordo com o seguinte protocolo:

Tabela 1 — Protocolo de Revisão Sistemática para Conexão entre Compostagem e Aquaponia

Aspecto	Descrição
Pergunta de pesquisa	"Em que medida a água residuária da aquaponia pode suprir as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas urbanas, resultando em um composto orgânico nutricionalmente equilibrado?"
Bases de dados utilizadas	Web of Science e Google Scholar
Idioma	Apenas artigos escritos em inglês
Palavras-chave	"compostagem AND aquaponia"
Ano de publicação	De 2000 a 2024, a fim de manter o intervalo próximo às pesquisas anteriores
Tipo de publicação	Artigos e artigos de revisão
Procedimento de seleção	Os artigos passaram por um processo de seleção em três etapas.
- Título	Os artigos foram inicialmente avaliados apenas pelo título para verificar se eram relevantes para o estudo.
- Resumo	Os resumos dos artigos selecionados na primeira etapa foram revisados para uma triagem mais detalhada.
- Leitura do texto completo	Os artigos que passaram pela segunda triagem tiveram seus textos completos lidos para confirmar sua relevância e adequação ao estudo.
Crítérios de inclusão/exclusão	Foram excluídos artigos que abordassem compostagem usando esterco de animais.

Fonte: O autor (2025).

O processo de triagem reduziu esse conjunto de artigos para 63, conforme mostra a Tabela abaixo:

Tabela 2 — Etapas da revisão sistemática sobre aquaponia e compostagem

Etapas	Referências
Pesquisas iniciais	2.940
Após exclusão de duplicatas	2.793
Seleção daqueles com mais de 30 citações	135
Após a leitura do título	106
Depois da leitura abstrata	84
Após a leitura do texto completo	63

Fonte: O autor (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compilando as informações dos artigos sobre aquaponia, destacam-se os seguintes pontos chaves:

- **Crescimento da pesquisa em aquaponia:** Houve um aumento constante no número de publicações sobre aquaponia desde 2010, indicando um interesse crescente nesta área. os artigos são principalmente focados
- **Foco da pesquisa:** Os estudos têm se concentrado principalmente nos componentes do sistema, tratamento de águas residuais, manejo de nutrientes e produção do sistema.
- **Vantagens da aquaponia:** Incluem conservação de água, melhoria na taxa de crescimento e rendimento, segurança alimentar, eficiência espacial, redução da poluição e do consumo de energia, e adaptabilidade às áreas urbanas.
- **Desafios:** Incluem a necessidade de capital inicial, dependência de energia elétrica estável, necessidade de suplementação de nutrientes e alcance do equilíbrio na proporção planta-peixe.
- **Aspectos ambientais:** A aquaponia mostra uma redução no potencial de aquecimento global e na escassez de recursos fósseis em comparação com outros métodos de produção.
- **Parâmetros críticos:** pH da água, temperatura, oxigênio dissolvido, níveis de compostos nitrogenados e condutividade elétrica são fundamentais para o sucesso do sistema.
- **Tecnologia e automação:** Há uma tendência crescente para o uso de IoT (internet das coisas) e IA para monitoramento e otimização dos sistemas.
- **Identidade e reconhecimento de mercado:** existe uma necessidade de esclarecer a identidade da aquaponia no contexto urbano para obter maior reconhecimento de mercado.

Quanto à **conexão dos artigos com o tema aquaponia**, compostagem e centros urbanos, percebe-se os seguintes pontos chaves:

- **Conexão forte com aquaponia:** os artigos são principalmente focados em aquaponia, abordando diversos aspectos desta técnica.

- **Conexão limitada com compostagem:** há pouca menção direta à compostagem.
- **Conexão moderada com centros urbanos:** vários estudos mencionam o potencial da aquaponia em áreas urbanas, destacando sua eficiência espacial e adaptabilidade. No entanto, não há uma discussão detalhada sobre os desafios específicos da implementação em centros urbanos.
- **Lacuna identificada:** os artigos indicam que há uma lacuna de pesquisa sobre a gestão de resíduos em sistemas aquapônicos, especialmente em contextos urbanos. Isso sugere uma oportunidade para explorar mais a conexão entre aquaponia, compostagem e centros urbanos.

Os artigos fornecem uma visão abrangente sobre aquaponia; contudo, há lacuna notável sobre compostagem baseado em critérios metodológicos e sua integração com sistemas aquapônicos em ambientes urbanos. Esta poderia ser uma área importante para futuras pesquisas, considerando o potencial de criar sistemas alimentares urbanos mais circulares e sustentáveis.

Tabela 3 — Análise dos artigos quanto ao potencial de uso da água residuária da aquaponia

Categoria de Análise	Número de Artigos	Percentual	Principais Referências
Mencionam o potencial de uso da água residuária da aquaponia	28	44,4%	YILONG HAO et al. (2020); A. IBRAHIM et al. (2023); DUARTE et al. (2023); A. REYES YANES et al. (2020)
Discutem especificamente o uso da água residuária em compostagem	12	19,0%	BIZON e SOARES DE CASTRO (2023); A. IBRAHIM et al. (2023)
Abordam a integração com compostagem de poda urbana	4	6,3%	BIZON e SOARES DE CASTRO (2023); A. IBRAHIM et al. (2023)
Relacionam com economia circular e cidades sustentáveis	15	23,8%	YILONG HAO et al. (2020); VILAS BOAS DIAS; DIANA NAVARRO (2022); A. IBRAHIM et al. (2023)
Não abordam o uso da água residuária	35	55,6%	Demais artigos

Fonte: O autor (2025).

A análise detalhada dos 63 artigos selecionados (Tabela 2) revelou que menos da metade (44,4%) dos estudos abordam explicitamente o potencial de uso da água residuária da aquaponia, sendo que apenas 19% discutem sua aplicação em processos de compostagem. Mais especificamente, somente 4 artigos (6,3%) abordam a integração com compostagem de poda urbana, indicando uma lacuna significativa na literatura sobre este tema específico. É notável que 23,8% dos estudos estabelecem conexões com economia circular e cidades sustentáveis, sugerindo um crescente interesse na integração da aquaponia com estratégias mais amplas de sustentabilidade urbana. Esta análise evidencia a necessidade de mais pesquisas focadas especificamente na integração entre sistemas aquapônicos e processos de compostagem de resíduos urbanos.

3.1.1 EVOLUÇÃO DA AQUAPONIA EM CONTEXTOS URBANOS

A análise sistemática da literatura revelou uma evolução significativa no conceito e aplicação da aquaponia, particularmente em ambientes urbanos. De acordo com Yilong Hao et al. (2020), houve uma transição notável de sistemas puramente produtivos para abordagens multifuncionais que integram aspectos de sustentabilidade urbana e economia circular. Esta evolução é evidenciada pelo crescimento exponencial de publicações sobre aquaponia urbana entre 2010 e 2024, com ênfase particular em aplicações que promovem o fechamento de ciclos de nutrientes.

A adaptação da aquaponia para contextos urbanos tem sido impulsionada por diversos fatores. Segundo A. Ibrahim et al. (2023), as pressões crescentes sobre recursos naturais e a necessidade de sistemas alimentares mais resilientes têm motivado o desenvolvimento de soluções tecnológicas que otimizam o uso de espaço e recursos em ambientes urbanos. Os autores identificaram que sistemas aquapônicos bem projetados podem reduzir o consumo de água em até 90% em comparação com a agricultura convencional.

3.1.2 INTEGRAÇÃO COM ECONOMIA CIRCULAR

A integração entre aquaponia e princípios de economia circular emerge como um aspecto crucial para a sustentabilidade urbana. Goddek et al. (2015) identificaram que o principal desafio está na otimização do uso de nutrientes, especialmente na interface

entre sistemas aquapônicos e processos de compostagem. Os autores destacam que a água residual da aquaponia, rica em nitrogênio, pode ser efetivamente utilizada para enriquecer processos de compostagem, criando um ciclo fechado de nutrientes.

Esta sinergia é particularmente relevante quando consideramos o contexto urbano do Distrito Federal, onde, conforme apontado por Bizon e Soares de Castro (2023), existe um volume significativo de resíduos orgânicos e podas urbanas que poderiam ser integrados a sistemas aquapônicos. Os autores identificaram que aproximadamente 47,9% dos produtores aquapônicos já utilizam alguma forma de integração com outros sistemas de produção, embora de maneira não otimizada.

3.1.3 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E GESTÃO INTELIGENTE

O desenvolvimento de sistemas aquapônicos urbanos tem sido potencializado por inovações tecnológicas significativas. A. Reyes Yanes et al. (2020) descrevem a emergência do conceito de "Aquaponia 4.0", caracterizado pela integração de:

- Sensores IoT para monitoramento em tempo real
- Sistemas automatizados de controle
- Análise de dados para otimização de produção
- Interfaces digitais para gestão remota

Estas inovações têm permitido maior precisão no controle de parâmetros críticos como pH, temperatura e níveis de nutrientes, resultando em sistemas mais eficientes e produtivos. Duarte et al. (2023) demonstraram que sistemas aquapônicos tecnologicamente avançados podem alcançar produtividades comparáveis ou superiores a sistemas hidropônicos convencionais, com a vantagem adicional de produzirem proteína animal.

3.1.4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA IMPLEMENTAÇÃO

A implementação de sistemas aquapônicos em contextos urbanos apresenta desafios específicos que precisam ser considerados. De acordo com A. Ibrahim et al. (2023), os principais obstáculos incluem:

- Custos iniciais de implementação
- Necessidade de capacitação técnica especializada
- Barreiras regulatórias e normativas

- Aceitação social e cultural

No entanto, estes desafios são contrabalançados por oportunidades significativas. Vilas Boas Dias e Diana Navarro (2022) identificaram que a integração de sistemas aquapônicos em ambientes urbanos pode contribuir para:

- Segurança alimentar local
- Geração de empregos verdes
- Educação ambiental
- Desenvolvimento comunitário

3.1.5 PERSPECTIVAS FUTURAS E RECOMENDAÇÕES

A análise da literatura sugere que o futuro da aquaponia urbana está intrinsecamente ligado à sua capacidade de integração com outros sistemas e tecnologias. Yilong Hao et al. (2020) projetam um cenário onde sistemas aquapônicos se tornarão componentes fundamentais de infraestruturas verdes urbanas, contribuindo para a resiliência e sustentabilidade das cidades. Para potencializar esta integração, recomenda-se:

- Desenvolvimento de políticas públicas específicas;
- Investimento em pesquisa e desenvolvimento;
- Fortalecimento de redes de conhecimento;
- Criação de programas de capacitação técnica.

A implementação destas recomendações deve considerar as particularidades locais e buscar sinergias com iniciativas existentes de agricultura urbana e gestão de resíduos.

4 CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática da literatura evidencia que a integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem representa uma oportunidade significativa para o desenvolvimento de sistemas alimentares urbanos mais sustentáveis e circulares. A análise dos 63 artigos selecionados revelou uma evolução significativa na concepção e implementação de sistemas aquapônicos, particularmente em contextos urbanos, onde a otimização do uso de recursos e espaço é fundamental.

O estudo identificou que a água residuária da aquaponia, rica em nitrogênio, apresenta potencial significativo para enriquecer processos de compostagem de podas

urbanas, criando um ciclo fechado de nutrientes que exemplifica os princípios da economia circular. Esta sinergia é particularmente relevante no contexto do Distrito Federal, onde existe um volume significativo de resíduos orgânicos e podas urbanas que poderiam ser integrados a sistemas aquapônicos.

A emergência do conceito de "Aquaponia 4.0", caracterizado pela incorporação de tecnologias IoT e sistemas automatizados de controle, indica um caminho promissor para a otimização destes sistemas integrados. No entanto, a implementação bem-sucedida destes sistemas depende da superação de desafios específicos, incluindo custos iniciais de implementação, necessidade de capacitação técnica especializada e desenvolvimento de marcos regulatórios apropriados.

A análise revelou que, em um estudo significativo com 89 sistemas aquapônicos no Brasil (BIZON e SOARES DE CASTRO, 2023), aproximadamente 47,9% dos produtores já utilizam a água residuária para fertilização direta de outras culturas, e 9,4% a direcionam para compostagem. Estes dados indicam não apenas a existência de práticas de reaproveitamento de nutrientes, mas também um potencial significativo para otimização e expansão da integração entre aquaponia e compostagem em escala urbana.

Recomenda-se que pesquisas futuras se concentrem em:

- Desenvolvimento de protocolos específicos para otimização da integração entre aquaponia e compostagem
- Análise quantitativa dos benefícios econômicos e ambientais desta integração
- Estudos sobre a viabilidade de implementação em diferentes escalas no contexto do DF
- Investigação de modelos de negócio que possam tornar estes sistemas economicamente sustentáveis
- Desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a adoção destas práticas

Por fim, conclui-se que a integração entre aquaponia e compostagem representa não apenas uma solução técnica para a gestão de resíduos orgânicos urbanos, mas também uma oportunidade para o desenvolvimento de sistemas alimentares mais resilientes e sustentáveis em ambientes urbanos. O sucesso desta integração dependerá do compromisso contínuo com pesquisa, desenvolvimento tecnológico e apoio institucional, especialmente considerando que as práticas atuais de reaproveitamento de nutrientes, embora promissoras, ainda podem ser significativamente otimizadas.

REFERÊNCIAS

- A. IBRAHIM, Lubna *et al.* **Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency**. *Water* . <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/24/4310>, 2023, p. 15-24. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15244310>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- A. REYES YANES, *et al.* **Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems**. *Journal of Cleaner Production*. Science Direct, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>. Acesso em: 13 out. 2024.
- BIZON, Larissa ; SOARES DE CASTRO, Marco Aurélio . **AQUAPONICS IN BRAZIL: REVIEW AND SURVEY ON WASTE MANAGEMENT PRACTICES**. 2023. 16 p. Disponível em: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.2.83120>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- DUARTE, Eglerson *et al.* **Nutrients in lettuce production in aquaponics with tilapia fish compared to that with hydroponics**. *Rev. Caatinga* 36. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n103rc>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- GODDEK , Simon *et al.* **Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics**. *Sustainability* . <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/4/4199>, 2015. 7(4) p. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su7044199>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- HUNDLEY, G. C., & NAVARRO, R. D.. *Aquaponia : a Integração Entre Piscicultura E a Hidroponia.. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)*, p. 52-61, 2013.
- VILAS BOAS DIAS, Thaís ; DIANA NAVARRO, Rodrigo (Coord.). **Uso da Aquaponia como Ferramenta para o Ensino em Ciências**. Brasília, 2022. 102 p Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade de Brasília.
- YILDIZ, H. Y., ROBAINA, L., PIRHONEN, J., MENTE, E., DOMÍNGUEZ, D., & PARISI, G. **Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review**. *Water*. 2017. 17 p. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/1/13>. Acesso em: 18 jul. 2024.

YILONG HAO, *et al.* **States, Trends, and Future of Aquaponics Research.** Sustainability. MDPI, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12187783>. Acesso em: 13 out. 2024.

Capítulo 2

Análise do cenário de compostagem do Distrito Federal e caracterização físico-química dos compostos

Dahiana Oliveira Ribeiro Rodrigues¹

Rodrigo Diana Navarro²

Pablo Henrique Salles André³

Jader Galba Busato⁴

RESUMO

Este estudo analisou o cenário de compostagem descentralizada no Distrito Federal (DF), abordando aspectos socioeconômicos e características físico-químicas dos compostos produzidos. Através de chamamento público, foram identificadas e avaliadas 10 iniciativas de compostagem atuantes no DF, que operam em pequenas áreas (4-40 m²) e com equipes reduzidas (1-15 pessoas), processando aproximadamente 7 ton/mês de resíduos orgânicos, predominantemente através de minhocários (72,7%). As análises revelaram compostos com elevada capacidade de troca catiônica (440-1362 mmol/kg) e teores médios de nitrogênio 1,49%. Identificou-se ausência de apoio governamental e baixa avaliação de políticas públicas associada à atividade de compostagem. A compostagem descentralizada representa estratégia viável para gestão sustentável de resíduos orgânicos urbanos no DF, mas ainda demanda maior apoio governamental para ampliar sua atuação e abrangência.

Palavras-chave: compostagem, economia circular, cidades sustentáveis, agricultura urbana, resíduos orgânicos.

ABSTRACT

This study analyzed the decentralized composting scenario in the Federal District of Brazil, addressing socioeconomic aspects and physicochemical characteristics of the

composts produced. Through a public call, 10 initiatives were identified and evaluated. The methodology combined socioeconomic questionnaires and laboratory analyses. These initiatives, operating in small areas (4-40 m²) with reduced teams (1-15 people), process approximately 7 tons/month of organic waste, predominantly through vermiculture (72.7%). Analyses revealed composts with satisfactory agronomic quality, high cation exchange capacity (440-1362 mmolc/kg), and adequate nitrogen content (average 1.49%), although with variability in moisture and electrical conductivity. Complete absence of government support and low evaluation of public policies (average 2.9/10) were identified. Five prospective scenarios were proposed. Decentralized composting represents a viable strategy for sustainable management of urban organic waste in the Federal District.

Keywords: composting, circular economy, sustainable cities, urban agriculture.

RESUMEN

Este estudio analizó el escenario de compostaje descentralizado en el Distrito Federal de Brasil, abordando aspectos socioeconómicos y características fisicoquímicas de los compost producidos. Mediante convocatoria pública, fueron identificadas y evaluadas 10 iniciativas. La metodología combinó cuestionarios socioeconómicos y análisis de laboratorio. Las iniciativas, operando en pequeñas áreas (4-40 m²) con equipos reducidos (1-15 personas), procesan aproximadamente 7 ton/mes de residuos orgánicos, predominantemente mediante vermicompostaje (72,7%). Los análisis revelaron compost con calidad agronómica satisfactoria, elevada capacidad de intercambio catiónico (440-1362 mmolc/kg) y adecuados contenidos de nitrógeno (promedio 1,49%), aunque con variabilidad en humedad y conductividad eléctrica. Se identificó ausencia de apoyo gubernamental y baja evaluación de políticas públicas (promedio 2,9/10). Fueron propuestos cinco escenarios prospectivos. El compostaje descentralizado representa una estrategia viable para la gestión sostenible de residuos orgánicos urbanos en el Distrito Federal.

Palabras clave: compostaje, economía circular, ciudades sostenibles, agricultura urbana.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, estima-se que cada habitante gere diariamente 1,0 kg de resíduos, com variações em função das macrorregiões nacionais (DIAGNÓSTICO, 2023). A explosão demográfica global representa um dos maiores desafios contemporâneos para a sustentabilidade urbana, particularmente no que tange à produção crescente de resíduos domésticos e comerciais. Projeções da International Solid Waste Association evidenciam uma tendência alarmante: o volume de resíduos sólidos urbanos, atualmente estimado em 2,1 bilhões de toneladas por ano, poderá quase duplicar, atingindo aproximadamente 3,8 bilhões de toneladas anuais até meados deste século (ISWA, 2024). Esta trajetória ascendente reflete não apenas o crescimento populacional, mas também as transformações nos padrões de consumo e descarte que caracterizam as sociedades contemporâneas.

A aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei Federal nº 12.305/2010) impulsionou as discussões a respeito da gestão de resíduos no Brasil e com ela várias definições foram apresentadas, tais como a dos RSU, que são aqueles provenientes de atividades domésticas em residências urbanas e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, além de outros serviços de limpeza urbana. Aproximadamente 77 milhões de toneladas de RSU foram gerados em 2022 no Brasil, dos quais 61% são destinados a espaços planejados para recebê-los (ABREMA, 2023). Assim, 39% dos RSU ainda são dispostos em locais inadequados, sendo este um cenário carente de urgente modificação.

A dimensão econômica da gestão de resíduos sólidos urbanos revela-se particularmente onerosa para as administrações públicas e sociedades. Segundo levantamentos econômicos da ISWA (2024), o dispêndio global para manutenção das cadeias operacionais de coleta, processamento, tratamento e disposição final de resíduos ultrapassou U\$ 252 bilhões em 2020. Quando incorporadas as externalidades negativas - como os impactos à saúde pública decorrentes da contaminação ambiental, as emissões de gases de efeito estufa e as consequências das mudanças climáticas associadas ao manejo inadequado - esta cifra se eleva para aproximadamente U\$ 361 bilhões. As projeções indicam que

estes custos poderão alcançar patamares ainda mais elevados, chegando a U\$ 640 bilhões anuais até 2050, caso os modelos atuais de gestão persistam.

No Brasil, o custo médio para o manejo dos RSU, englobando todas as macrorregiões, é de R\$ 112,28 por habitante (SINIR, 2019). A região Norte possui o menor custo (R\$ 90,18 por habitante), enquanto a região Sudeste, o maior (R\$ 142,53 por habitante). O Centro-Oeste foram gastos R\$ 122,26 por habitante. No Distrito Federal brasileiro (DF), o Serviço de Limpeza Urbana (SLU) destinou R\$ 28.558.986,73 somente para operação do aterro sanitário de Brasília, no ano de 2022 (SLU, 2023). Para custear os serviços associados aos RSU, recorre-se às taxas de limpeza pública, que tem sofrido reajustes consideráveis. Somente entre os anos de 2005 e 2023, essa taxa cresceu 199,24% no DF (RELATÓRIO, 2023).

Aproximadamente 55% dos RSU é de origem orgânica, o que possibilita a implementação de unidades de compostagem, permitindo reduzir a dependência de fertilizantes minerais destinados à agricultura e fomentar ações de economia circular. No Distrito Federal (DF), observa-se um movimento crescente nesta direção, com empresas de compostagem da fração orgânica dos RSU de pequeno e médio porte já em operação. Paralelamente, iniciativas descentralizadas em condomínios e instituições de ensino têm demonstrado o potencial de Brasília em se tornar uma referência nacional em práticas de economia circular. Contudo, informações sistematizadas a respeito dessas iniciativas ainda não foram publicadas. Dessa forma, informações sociais e econômicas e mesmo as características físico-químicas dos compostos obtidos não estão acessíveis.

Nesse sentido, os objetivos do presente trabalho foram: a) realizar levantamento socioeconômico das iniciativas de compostagem de empresas, condomínios, escolas e instituições que compostam seus resíduos orgânicos internamente, por meio de “Centrais de Compostagem”, b) valorar, quantificar e construir cenários de produtos e serviços das empresas, condomínios e escolas que praticam compostagem no DF.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi inicialmente realizado a partir da identificação e seleção das iniciativas de compostagem descentralizada atuantes no DF. Posteriormente foram realizadas a caracterização socioeconômica e as análises físico-químicas dos compostos produzidos.

A identificação das iniciativas de compostagem foi realizada mediante um processo estruturado de chamamento público. Um edital foi elaborado em parceria com o Instituto Arapoti, entidade sem fins lucrativos do DF especializada na implantação da sustentabilidade, que atua com os programas Condomínio Sustentável, Escola Sustentável e Empresa Sustentável. O edital de chamamento público, lançado em 06 de junho de 2024, foi amplamente divulgado nas redes sociais durante o período de 10 de junho a 10 de julho de 2024. O documento explicitava os objetivos da pesquisa, os benefícios para os participantes - incluindo análises laboratoriais gratuitas dos compostos e visibilidade institucional em publicações científicas -, além do cronograma completo do projeto. As inscrições foram realizadas de forma online através de formulário específico, e não houve processo seletivo eliminatório, sendo todos os inscritos contemplados na pesquisa. A validação das inscrições ocorreu entre 10 e 15 de julho de 2024, seguida pelo feedback aos participantes entre 15 e 20 de julho.

Após a confirmação das inscrições, foram realizadas visitas técnicas presenciais às iniciativas participantes durante o mês de agosto de 2024 (01 a 30 de agosto). As visitas tiveram dois objetivos principais: aplicação de questionário para caracterização socioeconômica e coleta de amostras dos compostos para análise laboratorial. O questionário foi aplicado utilizando a plataforma Google Forms, sendo conduzido presencialmente com proprietários, síndicos ou diretores das instituições. O instrumento abordou os seguintes aspectos: Identificação das iniciativas (forma jurídica e localização); Número de funcionários e composição de gênero do quadro; Serviços oferecidos e público-alvo atendido; Existência de contrato ou colaboração com órgãos públicos; Tipo de investimento (público ou privado); Situação do terreno em que opera as atividades; Tipificação dos resíduos recebidos ou coletados; Volume ou massa estimada de resíduos processados; Método de compostagem empregado;

Índice de rejeito gerado; Tempo estimado para finalização do processo de compostagem; Destino do composto produzido; Realização de análises nos compostos e sua periodicidade; Tipo de equipamentos de transporte disponível; Forma de pagamento pelo serviço e valores (quando aplicável); Avaliação das políticas públicas de fomento ao setor (escala de 0 a 10) e Principais desafios encontrados.

Os dados coletados foram compilados e analisados de forma descritiva, considerando valores mínimos, máximos e médios para as variáveis quantitativas, e distribuição de frequência para as variáveis qualitativas.

Durante as visitas realizadas, foram coletadas amostras dos compostos produzidos em cada uma das iniciativas participantes. Para garantir representatividade, adotou-se o protocolo de amostragem composta, em que múltiplas subamostras foram coletadas em diferentes pontos e profundidades das pilhas ou leiras de compostagem, formando uma amostra única representativa para cada iniciativa. As amostras foram coletadas somente de compostos já estabilizados, ou seja, materiais que já haviam passado pelo ciclo completo de compostagem segundo o método utilizado por cada participante. Foram coletados aproximadamente 1 kg de material por amostra, acondicionados em sacos plásticos estéreis, identificados e transportados sob refrigeração até o laboratório.

As análises físico-químicas e microbiológicas foram realizadas pelo Laboratório de Química do Solo da Universidade de Brasília, vinculado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Os parâmetros analisados incluíram: umidade (60-65°C); pH (CaCl_2), condutividade elétrica, nitrogênio total, carbono orgânico, relação C/N, capacidade de troca catiônica (CTC), fósforo total, potássio total, cálcio total, magnésio total, enxofre, micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo) e elementos potencialmente tóxicos (Pb, Hg, Cr, As, Ni, Cd); c) Parâmetros microbiológicos: coliformes termotolerantes e *Salmonella* sp.

As metodologias analíticas seguiram os protocolos estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), conforme indicado nas referências de cada método, nas tabelas de resultados. Posteriormente, os dados foram compilados,

tabulados e analisados comparativamente, considerando os valores de referência estabelecidos pela legislação (Instruções Normativas SDA nº 61/2020 e nº 7/2016) e literatura científica especializada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como forma de fomentar uma discussão assertiva dos resultados encontrados das análises laboratoriais, foi elaborada uma tabela os parâmetros analisados, sua importância agrônômica e valores ideais/referência, conforme tabela abaixo:

Tabela 1 - Parâmetros agrônômicos e valores de referência para compostos orgânicos em hortaliças

Variável	Importância Agrônômica ou valor à prática agrícola	Valores Ideais/Referência
Umidade (60-65°C)	Indicador do processo de compostagem Influencia atividade microbiana e mineralização Afeta manejo e aplicação do composto Facilita incorporação homogênea ao solo	< 40% (outros fertilizantes orgânicos) < 50% (húmus de minhoca) 40-50% (fase de maturação) 25-35% (produto final)
pH (H ₂ O e CaCl ₂)	Indicador de maturidade do composto Influência na disponibilidade de nutrientes Afeta atividade microbiana do solo Impacta absorção de nutrientes	pH (H ₂ O): 6,0 a 7,5 (cultivo convencional) pH 6,0 a 7,0 (ideal para maioria das hortaliças)
Condutividade Elétrica	Indicador de salinidade Afeta desenvolvimento radicular Importante para manejo da fertirrigação Crítico para hortaliças sensíveis	< 1000 µS/cm (produção de mudas) < 2000 µS/cm (cultivo em solo) < 3000 µS/cm (limite máximo para maioria das hortaliças)
Nitrogênio Total	Crescimento vegetativo Síntese de clorofila Produção de proteínas Desenvolvimento foliar	> 0,5% (mínimo MAPA) 1,0 a 3,0% (ideal para compostos maturados) > 1,5% (recomendado para hortaliças folhosas)

Carbono Orgânico	Estrutura física do solo Retenção de água Atividade microbiana Disponibilidade de nutrientes	> 15% (outros fertilizantes orgânicos) > 10% (húmus de minhoca) 20-40% (ideal para compostos maturados)
Relação C/N	Indica maturação do composto Influencia mineralização Disponibilidade de N Atividade microbiana	10:1 a 20:1 (composto maturado) < 10:1 (mineralização rápida) > 20:1 (imobilização de N)
CTC	Retenção de nutrientes Redução de lixiviação Eficiência da adubação Disponibilidade de nutrientes	> 200 mmolc/kg (mínimo) 400-600 mmolc/kg (ideal) > 600 mmolc/kg (excelente)
Fósforo Total	Desenvolvimento radicular Floração e frutificação Metabolismo energético Fase inicial de cultivo	P ₂ O ₅ : > 1% (mínimo) 1,5-3,0% (ideal para hortaliças) > 2% (culturas mais exigentes)
Potássio Total	Regulação osmótica Qualidade dos frutos Resistência a doenças Translocação de açúcares	K ₂ O: > 1% (mínimo) 1,5-3,0% (ideal para hortaliças) > 2% (hortaliças-fruto)
Cálcio Total	Estrutura celular Prevenção de distúrbios Vida pós-colheita Qualidade dos frutos	> 1% (mínimo) 2-4% (ideal para hortaliças) > 3% (culturas exigentes)
Magnési o Total	Síntese de clorofila Metabolismo energético Fotossíntese Prevenção de clorose	> 0,5% (mínimo) 0,8-2,0% (ideal para hortaliças) > 1% (hortaliças folhosas)
Micronutr ientes	Fe: síntese de clorofila Cu: processos enzimáticos Zn: hormônios de crescimento Mn: fotossíntese B: transporte de açúcares Mo: metabolismo do N	Fe: 20-200 mg/kg Cu: 5-100 mg/kg Zn: 10-200 mg/kg Mn: 20-400 mg/kg B: 10-50 mg/kg Mo: 1-5 mg/kg

Metais Pesados	Limites para segurança Qualidade do composto Conformidade legal Segurança alimentar	Cd: < 3 mg/kg Pb: < 150 mg/kg Cr: < 2 mg/kg Ni: < 70 mg/kg Hg: < 1 mg/kg As: < 20 mg/kg
Parâmetros Sanitários	Segurança microbiológica Qualidade sanitária Conformidade legal Segurança alimentar	Coliformes termotolerantes: < 1000 NMP/g MS Salmonella: ausência em 10g MS Ovos viáveis de helmintos: < 1 em 4g ST

*Fonte: Compilado com base nas normativas MAPA IN SDA nº 61/2020 e nº 7/2016, e literatura científica em nutrição de hortaliças***

Notas: MS = Matéria Seca ST = Sólidos Totais NMP = Número Mais Provável Valores podem variar conforme condições específicas de cultivo e espécie de hortaliça

As tabelas abaixo apresentam as análises comparativas dos compostos orgânicos do DF com os resultados das análises laboratoriais realizadas no presente trabalho.

Tabela 2. Caracterização Físico-Química por local e tipo de material

Local	Tipo Material	Umidade (%)	pH (CaCl ₂)	C.E. (µS/cm)	N total (%)	C org. (%)	C/N	CTC (mmol _c /kg)	CTC/C
Instituição 1	Minhocário	56,84	7,30	854,00	1,48	29,66	20,10	1052,83	35,49
Instituição 1	Composto de poda	35,43	6,69	302,00	1,25	28,22	22,65	1362,67	48,29
Escola 1	Minhocário	75,31	8,22	1007,00	1,50	31,53	21,20	867,01	27,50
Condomínio 1	[Composto]	27,38	5,13	4614,00	2,03	32,53	16,03	440,53	13,54
Condomínio 2	Minhocário	67,61	7,99	1284,00	2,15	24,07	11,18	1034,28	42,97

Local	Tipo Material	Umidade (%)	pH (CaCl ₂)	C.E. (μS/cm)	N total (%)	C org. (%)	C/N	CTC (mmol _c /kg)	CTC/C
Condomínio 3	Poda	44,96	6,62	328,00	0,59	13,74	23,40	547,52	39,86
Cooperativa 1	[Composto]	70,63	7,31	1207,00	1,66	26,42	15,93	749,11	28,35
Instituição 2	[Composto]	18,61	6,20	4273,00	2,29	27,95	12,20	947,14	33,89
Horta Comunitária 1	[Minhocário]	77,48	7,37	435,00	1,11	29,76	26,82	797,27	26,79
Condomínio 4	Minhocário	73,52	8,36	1947,00	1,41	18,85	13,38	919,37	48,77
Empresa 1	[Composto]	65,32	7,69	1461,00	0,99	20,66	20,91	547,74	27,81

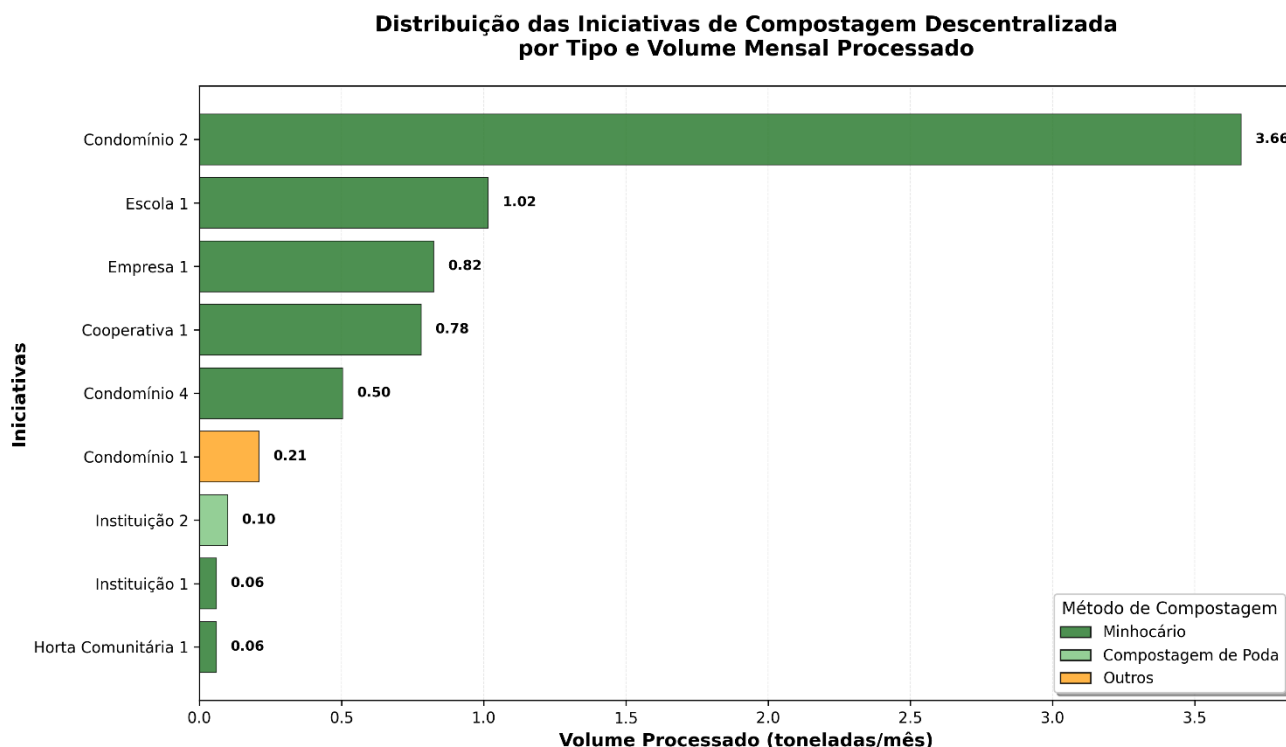


Figura 1. Distribuição das iniciativas de compostagem descentralizada no Distrito Federal por tipo de método e volume mensal processado. As barras indicam o volume em toneladas/mês processado por cada iniciativa. Cores representam o método de compostagem utilizado: verde escuro (minhocário), verde claro (compostagem de poda) e laranja (outros métodos). N=9 iniciativas. Dados coletados em agosto de 2024.

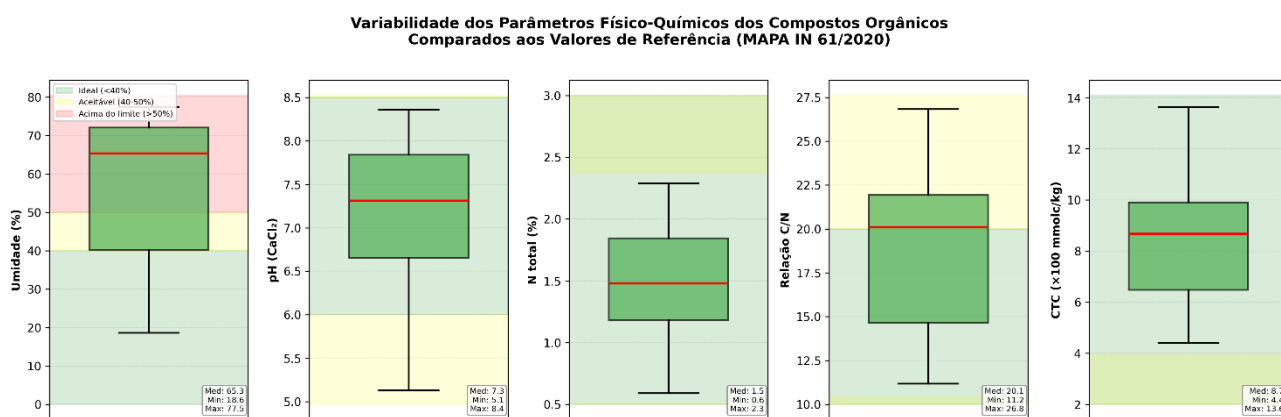


Figura 2. Variabilidade dos parâmetros físico-químicos dos compostos orgânicos comparados aos valores de referência estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 61/2020 (MAPA). As caixas verdes representam o intervalo interquartil (25-75%), a linha vermelha indica

a mediana, e os bigodes mostram a amplitude total dos dados. Áreas sombreadas indicam faixas de referência: verde (ideal), amarelo (aceitável) e vermelho (fora do recomendado). CTC apresentada em escala $\times 100$ para melhor visualização. N=11 amostras. Análises realizadas no Laboratório de Solos da UnB, agosto-setembro de 2024.

Tabela 3. Teores de Macro e Micronutrientes por Local e Tipo de Material (g/kg para macronutrientes, mg/kg para micronutrientes)

Local	Tipo Material	P total	K total	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	Mo
Instituição 1	Minhocário	2,90	7,59	35,28	3,23	3,21	22,19	15,82	72,12	188,27	59,25
Instituição 1	Composto de poda	1,21	4,62	37,22	3,39	1,77	25,01	17,61	34,18	107,16	44,63
Escola 1	Minhocário	4,03	15,10	22,23	3,31	3,34	3,96	21,91	51,96	66,28	96,52
Condomínio 1	[Composto]	3,56	10,74	47,05	1,74	2,04	1,48	10,00	28,56	29,82	85,84
Condomínio 2	Minhocário	6,48	13,89	51,60	4,26	4,45	4,41	28,91	79,61	92,19	5,64
Condomínio 3	Poda	1,24	3,26	14,35	2,31	1,40	19,08	13,01	43,24	99,26	21,43
Cooperativa 1	[Composto]	3,07	7,03	19,46	2,67	3,39	3,85	49,78	243,00	368,93	6,78
Instituição 2	[Composto]	3,15	7,09	53,37	5,29	3,24	3,01	19,07	67,53	90,08	4,85
Horta Comunitária 1	[Minhocário]	2,93	4,45	21,60	2,42	3,44	6,17	13,80	86,20	68,33	10,47
Condomínio 4	[Minhocário]	4,55	20,60	162,64	4,71	3,75	4,37	26,13	114,55	108,97	4,45
Empresa 1	[Composto]	3,04	6,05	20,40	2,12	2,67	24,25	11,03	76,57	103,48	6,03

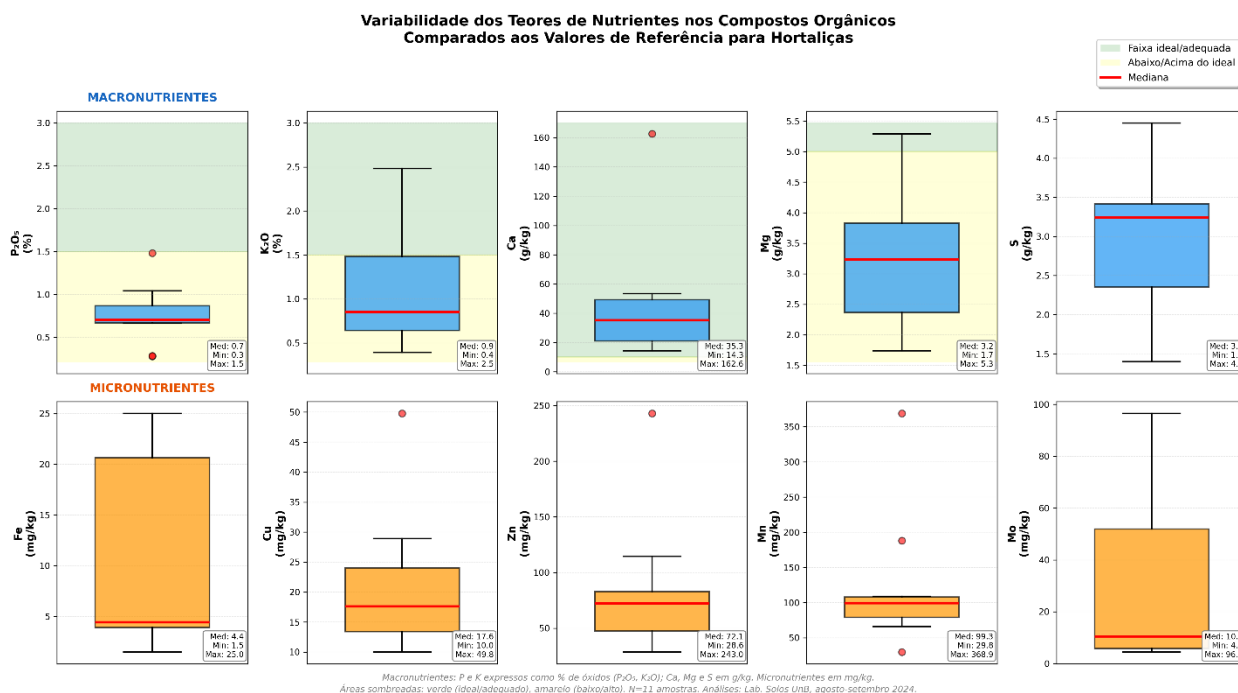


Figura 3. Variabilidade dos teores de macronutrientes e micronutrientes nos compostos orgânicos do Distrito Federal comparados aos valores de referência para hortaliças. Macronutrientes: P e K expressos como porcentagem de óxidos (P_2O_5 , K_2O); Ca, Mg e S em g/kg. Micronutrientes expressos em mg/kg. As caixas representam o intervalo interquartil (25-75%), a linha vermelha indica a mediana, e os bigodes mostram a amplitude total dos dados. Círculos vermelhos indicam valores atípicos (outliers). Áreas sombreadas indicam faixas de referência: verde (ideal/adequado) e amarelo (abaixo ou acima do ideal). N=11 amostras. Análises realizadas no Laboratório de Solos da UnB, agosto-setembro de 2024.

A Figura 3 revela padrões contrastantes entre macro e micronutrientes. Enquanto o cálcio apresentou teores adequados em 100% das amostras, o fósforo mostrou-se deficiente em todas (média de 0,75% P_2O_5 vs. ideal de 1,5-3,0%), indicando necessidade de complementação fosfatada para culturas mais exigentes. O magnésio também se mostrou limitante em 91% das amostras. Os micronutrientes apresentaram variabilidade extremamente elevada, com coeficientes de variação entre 55% e 110%, refletindo a diversidade de matérias-primas e processos utilizados. Destaca-se a Cooperativa 1 com valores excepcionalmente altos de Zn (243 mg/kg) e Mn (369 mg/kg), possivelmente devido à incorporação de materiais específicos ricos nestes elementos.

Tabela 4. Elementos Potencialmente Tóxicos e Aspectos Sanitários

Local	Tipo Material	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Coliformes (NMP/g MS)	Salmonella
Instituição 1	Minhocário	nd	nd	nd	8,24	nd	nd	-	Ausência
Instituição 1	Composto de poda	nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	Ausência
Escola 1	Minhocário	11,04	nd	nd	3,01	nd	nd	-	Ausência
Condomínio 1	[Composto]	3,49	nd	nd	4,77	nd	nd	-	Ausência
Condomínio 2	Minhocário	nd	nd	nd	7,52	nd	nd	-	Ausência
Condomínio 3	Poda	2,44	nd	nd	14,58	nd	nd	-	Ausência
Cooperativa 1	[Composto]	nd	nd	nd	nd	nd	0,28	-	Ausência
Instituição 2	[Composto]	nd	nd	nd	7,52	nd	nd	-	Ausência
Horta Comunitária 1	[Minhocário]	nd	nd	nd	2,25	nd	nd	-	Ausência
Condomínio 4	[Minhocário]	nd	nd	nd	nd	nd	0,24	-	Ausência
Empresa 1	[Composto]	nd	nd	nd	1,26	nd	nd	-	Ausência

Notas:

1. nd = não detectado
2. Coliformes expressos em NMP/g de MS
3. Todos os valores de metais pesados em mg/kg
4. (-) = análise não realizada

As análises mostram que os compostos orgânicos produzidos pelas diferentes iniciativas do DF apresentam características físico-químicas variadas, refletindo a diversidade de matérias-primas e métodos de compostagem utilizados. Em geral, os parâmetros avaliados indicam que os compostos possuem qualidade satisfatória para uso agrícola, com valores adequados de CTC, relação C/N e teores de macro e micronutrientes.

A análise da umidade dos compostos revela uma ampla variação entre as iniciativas, com valores entre 18,61% (Instituição 2) e 77,48% (Horta Comunitária 1), sendo que 7 das 11 amostras (63,6%) apresentaram teores acima do limite recomendado pela IN SDA nº 61/2020 (<40% para fertilizantes orgânicos e <50% para húmus de minhoca). Esta elevada umidade na maioria das amostras sugere que os compostos ainda não passaram por processos de secagem final adequados. Verifica-se que os compostos de minhocário geralmente apresentaram os maiores teores de umidade (média de 70,35%), provavelmente devido à necessidade de manutenção de

ambiente úmido para as minhocas, enquanto os compostos de poda mostraram os menores teores (média de 40,20%), refletindo o menor teor de água do material de origem.

Os valores de pH variaram entre 5,13 e 8,36, com média de 7,12, indicando predominância de compostos ligeiramente alcalinos. Apenas uma amostra (Condomínio 1) apresentou pH ácido (5,13), enquanto as demais amostras mostraram valores adequados à faixa ideal (6,0-7,5) recomendada para cultivo agrícola convencional. Este valor de pH é favorável para a maioria das culturas, especialmente considerando os solos brasileiros tipicamente ácidos.

A condutividade elétrica apresentou variação expressiva (302 a 4614 $\mu\text{S}/\text{cm}$), com duas amostras (Condomínio 1 e Instituição 2) excedendo o limite máximo recomendado para hortaliças (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). A elevada CE nestes compostos pode restringir seu uso para culturas sensíveis à salinidade e para produção de mudas, para as quais recomenda-se $\text{CE} < 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Observou-se que os compostos produzidos em minhocários apresentaram, em média, menor condutividade elétrica (853 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que os demais compostos (2120 $\mu\text{S}/\text{cm}$), possivelmente devido ao processamento da matéria orgânica pelas minhocas, que promove a absorção parcial de sais solúveis.

O teor de nitrogênio total variou de 0,59% a 2,29%, com média de 1,49%, sendo que apenas uma amostra (Condomínio 3 - Poda) apresentou valor abaixo do mínimo recomendado pelo MAPA (0,5%). A maioria das amostras (82%) apresentou teores na faixa ideal para compostos maturados (1,0-3,0%), demonstrando adequado potencial de fornecimento de nitrogênio para culturas. Os maiores teores foram observados na Instituição 2 (2,29%) e Condomínio 2 (2,15%), indicando maior decomposição de materiais proteicos ou adição de fontes nitrogenadas durante o processo de compostagem.

O carbono orgânico variou de 13,74% a 32,53%, com média de 25,80%, superando o mínimo estabelecido para fertilizantes orgânicos (15%) e húmus de minhoca (10%) na maioria das amostras. Apenas uma amostra (Condomínio 3 - Poda) apresentou teor inferior a 15%, possivelmente devido à natureza fibrosa e menos decomponível deste material.

A relação C/N, indicador importante da maturidade do composto, variou entre 11,18 e 26,82, com 45% das amostras na faixa ideal (10-20). Quatro amostras (36%) apresentaram valores acima de 20, sugerindo potencial imobilização temporária de nitrogênio quando aplicados ao solo. Este comportamento foi mais frequente nos compostos de origem vegetal (podas) e minhocários com menor tempo de maturação.

Os valores de CTC foram notavelmente elevados em todas as amostras (440,53 a 1362,67 mmol_c/kg), muito superiores ao mínimo desejável (200 mmol_c/kg), com 82% das amostras apresentando CTC >600 mmol_c/kg, classificada como "excelente". Esta característica indica alta capacidade de retenção e fornecimento gradual de nutrientes, além de sinalizar adequada humificação da matéria orgânica.

Os teores de fósforo total variaram de 1,21 a 6,48 g/kg, correspondendo a 0,27-1,49% de P₂O₅ (convertido pelo fator 0,436), com a maioria das amostras (73%) apresentando níveis abaixo do ideal para hortaliças (1,5-3,0% de P₂O₅). Isto sugere a necessidade potencial de complementação fosfatada para culturas mais exigentes.

O potássio apresentou valores entre 3,26 e 20,60 g/kg, equivalentes a 0,39-2,48% de K₂O (fator 0,830), com 45% das amostras dentro da faixa ideal para hortaliças (1,5-3,0%). Destaca-se o Condomínio 4 com teor expressivamente superior (20,60 g/kg), provavelmente devido à incorporação de resíduos ricos em potássio em seu processo.

Os teores de cálcio (14,35-162,64 g/kg) e magnésio (1,74-5,29 g/kg) foram adequados em todas as amostras, superando os valores mínimos recomendados (1% para Ca e 0,5% para Mg). A relação Ca variou entre 6,7:1 e 34,5:1, com média de 13,8:1, superior à faixa considerada ideal (3:1 a 5:1), indicando potencial desbalanceamento nutricional em algumas amostras.

Os micronutrientes apresentaram ampla variação entre as iniciativas, refletindo diferentes materiais de origem e processos. O ferro variou de 1,48 a 25,01 mg/kg, com quatro amostras abaixo da faixa recomendada (20-200 mg/kg). O cobre (10,00-49,78 mg/kg) e o zinco (28,56-243,00 mg/kg) mostraram-se adequados em todas as amostras. O manganês (29,82-368,93 mg/kg) apresentou concentrações elevadas em uma amostra (Cooperativa 1), próximas ao limite superior recomendado. O molibdênio (4,45-96,52 mg/kg) mostrou concentrações acima da faixa recomendada (1-5 mg/kg)

em 82% das amostras, característica que merece atenção por potencial toxicidade em aplicações sucessivas. O boro não foi detectado em nenhuma amostra, sugerindo limitação técnica na análise ou efetiva deficiência deste elemento nos compostos.

Todos os elementos potencialmente tóxicos analisados (Pb, Hg, Cr, As, Ni, Cd) apresentaram concentrações muito abaixo dos limites máximos estabelecidos pela IN SDA nº 7/2016, demonstrando segurança para aplicação agrícola. O chumbo foi detectado em apenas três amostras (máximo de 11,04 mg/kg, comparado ao limite de 150 mg/kg). O arsênio foi o elemento mais frequentemente detectado (7 amostras), porém em concentrações seguras (máximo de 14,58 mg/kg, comparado ao limite de 20 mg/kg). O cádmio foi detectado em apenas duas amostras, em concentrações mínimas (0,24-0,28 mg/kg). A ausência de mercúrio, cromo e níquel em todas as amostras é um indicador positivo de baixo risco ambiental.

A análise microbiológica, mesmo sem dados quantitativos de coliformes termotolerantes, demonstrou ausência de *Salmonella* em todas as amostras, atendendo ao requisito sanitário essencial para uso agrícola seguro.

Os compostos de minhocário apresentaram, em média, maior teor de matéria orgânica (27,19% contra 24,41% dos demais), maior umidade (70,35% contra 46,80%) e menor condutividade elétrica (853 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contra 2120 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Estas características sugerem que o processo mediado por minhocas produz compostos de maior estabilidade húmica e menor concentração de sais solúveis, porém com necessidade de ajustes no manejo da umidade.

Os compostos provenientes de condomínios mostraram maior variabilidade em seus parâmetros, refletindo diferenças nos materiais de origem e práticas de manejo. Esta heterogeneidade ressalta a importância de padronização e orientação técnica nestas iniciativas.

As amostras de instituições e escolas apresentaram, em média, melhores parâmetros de maturidade e equilíbrio nutricional, possivelmente devido à maior regularidade no manejo e acompanhamento do processo.

Esta análise comparativa evidencia que, apesar da diversidade de origens e processos, a maior parte dos compostos produzidos pelas iniciativas de compostagem

descentralizada no DF apresenta qualidade agronômica satisfatória, com potencial para uso agrícola, embora com necessidades específicas de manejo para cada tipo de material e aplicação.

Tabela 5. Características socioeconômicas das iniciativas de compostagem descentralizada no Distrito Federal

Iniciativa	Equipe total	Mulheres na equipe (%)	Equipe compostagem	Área (m²)	Volume (kg/m³)	Método de compostagem	Tempo de maturação (dias)	Manejo	Destino do composto	Análises laboratoriais	Apoio do GDF
Cooperativa 1	13	23%	2	10	780	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Condomínio 1	24	33%	2	15	504	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Condomínio 2	18	22%	2	24	3.662	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Condomínio 3	18	22%	2	15	SD*	Leiras estáticas	90-120	Manual	Uso próprio	Não	Não
Condomínio 4	98	66%	1	9	210	Processador mecânico	6-12 (horas)	Mecanizado	Uso próprio	Não	Não
Escola 1	68	85%	1	25	1.016	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Empresa 1	98	61%	2	30	824	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Horta Comunitária 1	NA**	NA**	NA**	5	60	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Instituição 1	89	SD*	2	40	60	Minhocário	30	Manual	Uso próprio	Não	Não
Instituição 2	80	33%	15	4	100	Leiras estáticas	180	Manual	Uso próprio	Não	Não

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Notas: SD* = Sem dados; NA** = Não aplicável.

A "Equipe total" refere-se ao número total de pessoas que trabalham na organização, enquanto o "percentual de mulheres" representa sua proporção na equipe total. "Equipe na compostagem" indica o número de pessoas que trabalham diretamente com o processo de compostagem. Todas as iniciativas utilizam recursos próprios para viabilização das unidades de compostagem e a maioria possui área coberta para realização do processo, com exceção da Instituição 2. O composto produzido é destinado exclusivamente para uso próprio em todas as iniciativas estudadas, não havendo comercialização. Ressalta-se que nenhuma das iniciativas

realiza análises laboratoriais do composto produzido ou recebe qualquer tipo de apoio governamental para suas atividades. A avaliação das políticas públicas para o setor apresentou média de 2,9 pontos (escala de 0 a 10), indicando insatisfação com o apoio governamental existente.

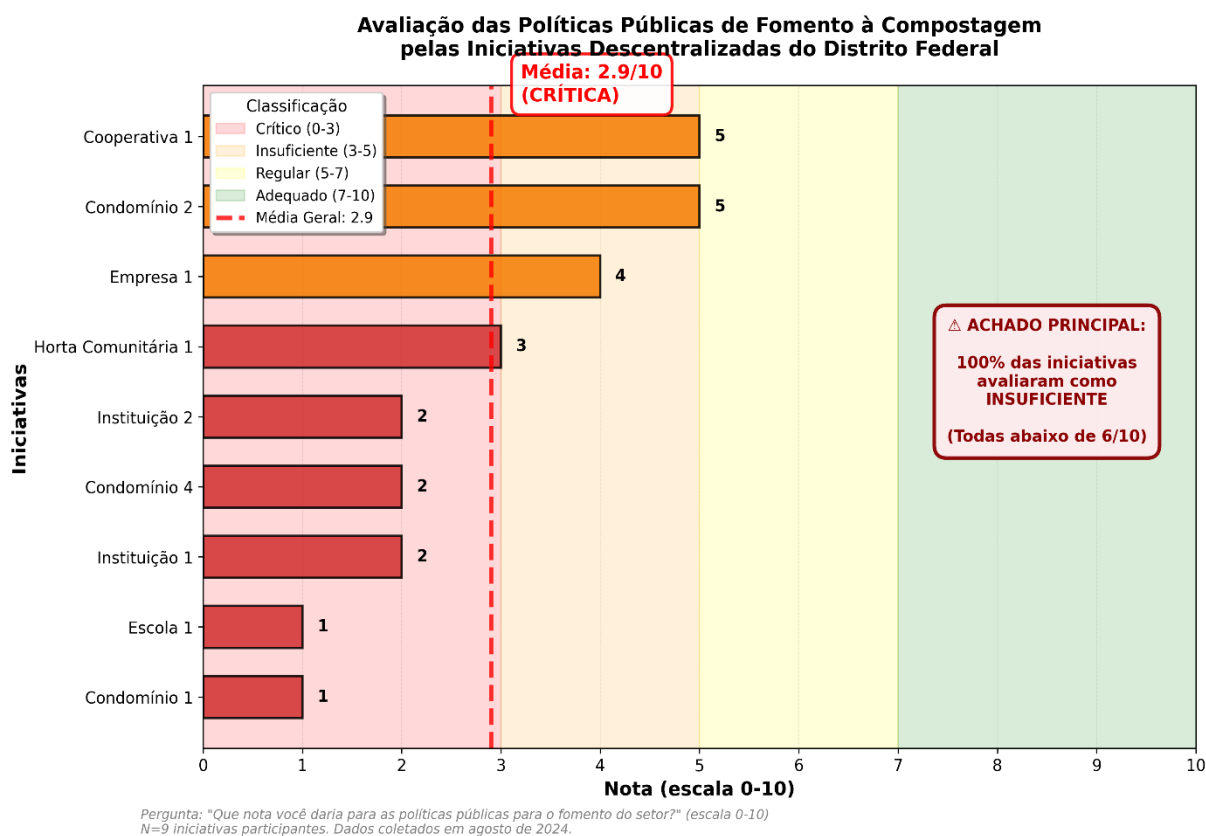


Figura 4. Avaliação das políticas públicas de fomento à compostagem pelas iniciativas descentralizadas do Distrito Federal (escala 0-10). As barras representam a nota atribuída por cada iniciativa, coloridas conforme classificação: vermelho (crítico, 0-3), laranja (insuficiente, 3-5), amarelo (regular, 5-7) e verde (adequado, 7-10). A linha tracejada vermelha indica a média geral (2,9/10). Áreas sombreadas no fundo demarcam as zonas de classificação. N=9 iniciativas. Pergunta: "Que nota você daria para as políticas públicas para o fomento do setor?" Dados coletados em agosto de 2024.

3.1 DISCUSSÃO

A partir dos dados socioeconômicos e físico-químicos obtidos neste estudo, é possível projetar cenários potenciais para o desenvolvimento de produtos e serviços no setor de compostagem descentralizada no Distrito Federal. Estes cenários consideram as características atuais das iniciativas analisadas, suas limitações e

potencialidades técnicas, bem como as tendências de mercado e políticas públicas para o setor.

3.1.1 Construção de Cenários de Produtos e Serviços da Compostagem Descentralizada no DF

- **Cenário 1: Redes Colaborativas de Compostagem Comunitária**

O primeiro cenário vislumbrado envolve a formação de Redes Colaborativas de Compostagem Comunitária, onde iniciativas descentralizadas em condomínios, escolas e instituições se organizariam para compartilhar conhecimentos, recursos e infraestrutura. Com base nos dados coletados, estas iniciativas já processam mais de 7 ton/mês, mesmo operando em pequenas áreas (5-40 m²), demonstrando significativo potencial quando organizadas coletivamente.

Neste modelo, seria possível desenvolver compostos orgânicos customizados para usos específicos como jardinagem e hortas urbanas, além de kits educativos sobre compostagem desenvolvidos a partir da experiência acumulada. Este cenário é favorecido pela presença significativa de mulheres nestas iniciativas (média de 44,5%), o que potencializa a abordagem educativa e comunitária do processo.

- **Cenário 2: Integração com Agricultura Urbana e Periurbana**

Um segundo cenário promissor seria a Integração com Agricultura Urbana e Periurbana, propondo a conexão sistemática das iniciativas de compostagem com projetos de produção de alimentos no DF, criando ciclos fechados de nutrientes. A qualidade agrônômica verificada nas análises, especialmente a elevada CTC, teores adequados de nitrogênio e boa relação C/N na maioria das amostras, viabiliza a aplicação direta dos compostos em produções locais de alimentos.

Este modelo permitiria o desenvolvimento de compostos com certificação participativa de qualidade, substratos específicos para culturas urbanas prioritárias e até mesmo fertilizantes líquidos derivados do processo,

como biofertilizantes e chás de composto. A ausência de contaminantes em níveis preocupantes e as concentrações de nutrientes compatíveis com as necessidades da maioria das hortaliças cultivadas em ambientes urbanos reforçam a viabilidade deste cenário.

- **Cenário 3: Digitalização e Monitoramento da Compostagem Descentralizada**

A Digitalização e Monitoramento da Compostagem Descentralizada emerge como um terceiro cenário relevante, incorporando tecnologias digitais para aprimorar a gestão e otimização das iniciativas existentes. Considerando que 100% das iniciativas pesquisadas não realizam análises regulares de seus compostos, a implementação de sistemas de monitoramento acessíveis poderia transformar significativamente a eficiência e qualidade dos processos.

Este cenário contemplaria o desenvolvimento de aplicativos para gestão de composteiras comunitárias, sensores de baixo custo para monitoramento de parâmetros críticos como temperatura e umidade, além de plataformas digitais para certificação e rastreabilidade dos compostos.

- **Cenário 4: Integração Público-Comunitária**

O cenário de Integração Público-Comunitária aborda a baixa avaliação das políticas públicas para o setor (média de 2,9 pontos em escala de 0 a 10) e a ausência de apoio governamental às iniciativas estudadas. Este modelo propõe uma governança compartilhada entre poder público e comunidade, onde poderiam ser desenvolvidos compostos certificados para uso em espaços públicos e projetos de arborização urbana. Este cenário apresenta potencial para redução dos custos de gestão de resíduos no DF (atualmente R\$ 28,5 milhões/ano somente para operação do aterro sanitário), enquanto proporciona benefícios socioambientais distribuídos territorialmente.

- **Cenário 5: Compostagem como Ferramenta de Educação Ambiental**

Por fim, a Compostagem como Ferramenta de Educação Ambiental destaca o potencial pedagógico das iniciativas, especialmente considerando a significativa participação de escolas e instituições na pesquisa. Neste cenário, a compostagem serve como processo demonstrativo de ciclos naturais e economia circular, podendo gerar materiais didáticos interdisciplinares, cursos formatados para diferentes faixas etárias e metodologias de ensino inovadoras. A segurança sanitária dos compostos verificada nas análises e a diversidade de iniciativas já existentes reforçam a viabilidade deste cenário educacional.

A implementação destes cenários depende de fatores como articulação entre iniciativas, capacitação técnica, sensibilização da população e, principalmente, estabelecimento de políticas públicas de apoio. No entanto, as evidências coletadas neste estudo indicam que existe viabilidade técnica e potencial socioeconômico para o desenvolvimento dessas abordagens no Distrito Federal, contribuindo significativamente para a gestão sustentável de resíduos orgânicos e para a economia circular urbana. A diversidade de características físico-químicas encontradas nos compostos analisados, longe de representar uma limitação, pode constituir uma oportunidade para o desenvolvimento de produtos e serviços customizados para diferentes necessidades e aplicações.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram o significativo potencial das iniciativas de compostagem descentralizada no Distrito Federal como estratégia para a gestão sustentável de resíduos orgânicos e promoção da economia circular urbana. A análise integrada dos aspectos socioeconômicos e das características físico-químicas dos compostos revela um panorama complexo e promissor, que merece considerações conclusivas sob múltiplas perspectivas.

A caracterização socioeconômica identificou um ecossistema diversificado de atores envolvidos na compostagem descentralizada, incluindo condomínios, escolas, empresas, cooperativas e instituições públicas. Estas iniciativas, embora operando em pequena escala (áreas entre 4-40 m²) e com equipes reduzidas (1-15 pessoas), conseguem processar volumes consideráveis de resíduos orgânicos (aproximadamente 7 toneladas/mês no conjunto analisado), demonstrando a viabilidade técnica e logística deste modelo. A predominância de métodos de baixa tecnologia, especialmente minhocários (72,7% das iniciativas), evidencia a acessibilidade e replicabilidade destas práticas, potencializando sua difusão em diferentes contextos urbanos.

Um aspecto crítico revelado pela pesquisa foi a completa ausência de apoio governamental e a baixa avaliação das políticas públicas para o setor (média de 2,9 em escala de 0-10), indicando uma lacuna significativa entre as práticas sustentáveis emergentes e o suporte institucional necessário para sua consolidação e expansão. Esta desconexão representa tanto um desafio quanto uma oportunidade para o desenvolvimento de políticas públicas que reconheçam e fomentem essas iniciativas como componentes estratégicos da gestão de resíduos urbanos, em consonância com os princípios da economia circular.

A análise físico-química dos compostos demonstrou que, apesar da diversidade de origens e métodos de produção, a maioria apresenta qualidade agronômica satisfatória para aplicações agrícolas urbanas, com destaque para a elevada capacidade de troca catiônica (440-1362 mmolc/kg), adequados teores de nitrogênio total (média de 1,49%) e ausência de contaminação por metais pesados em níveis preocupantes. No entanto, foram identificadas oportunidades de melhoria, especialmente quanto ao controle da umidade (63,6% das amostras com valores acima do recomendado) e à padronização de processos para reduzir a variabilidade observada em parâmetros críticos como condutividade elétrica (302-4614 μ S/cm) e relação C/N (11,18-26,82).

Os cenários prospectivos construídos a partir da análise integrada dos dados – Redes Colaborativas, Integração com Agricultura Urbana, Digitalização e Monitoramento, Integração Público-Comunitária e Compostagem como Ferramenta Educacional – delineiam caminhos viáveis para o fortalecimento e

expansão das iniciativas estudadas, explorando diferentes dimensões de valor socioeconômico e ambiental.

As implicações práticas deste estudo sugerem a necessidade de: (1) desenvolvimento de programas de capacitação técnica para otimização dos processos, visando maior homogeneidade e qualidade dos compostos; (2) estabelecimento de sistemas participativos de garantia de qualidade que considerem as especificidades da produção descentralizada; (3) criação de mecanismos de incentivo fiscal e suporte técnico governamental às iniciativas existentes; (4) construção de redes de colaboração entre diferentes atores do ecossistema de compostagem urbana; e (5) integração formal destas práticas nos planos municipais de gestão de resíduos sólidos.

Como limitações do estudo, destacam-se o número relativamente pequeno de iniciativas analisadas e a necessidade de acompanhamento longitudinal para avaliar a consistência da qualidade dos compostos ao longo do tempo. Pesquisas futuras poderiam explorar os impactos econômicos da incorporação sistemática destas iniciativas na gestão municipal de resíduos, o potencial de geração de emprego e renda em escala ampliada, e os benefícios específicos da aplicação destes compostos em diferentes cultivos urbanos.

Conclui-se que a compostagem descentralizada no Distrito Federal, apesar dos desafios identificados, representa uma estratégia viável e promissora para a gestão sustentável de resíduos orgânicos urbanos, com potencial para contribuir significativamente para a segurança alimentar local, a redução de custos com gestão de resíduos e a mitigação de impactos ambientais associados à disposição final em aterros sanitários. O desenvolvimento deste potencial, contudo, depende da construção de políticas públicas integradas e do fortalecimento das redes de colaboração entre os diversos atores envolvidos neste emergente ecossistema de economia circular urbana.

5 REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2022). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2025.

ABREU, M. F.; ABREU JUNIOR, C. H.; SILVA, F. C.; SANTOS, G. C. G.; ANDRADE, J. C.; GOMES, T. F.; COSCIONE, A. R.; ANDRADE, C. A. Análise química de fertilizantes orgânicos (urbanos). In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 397-486.

ÁLVAREZ-ALONSO, C. et al. **Municipal Solid Waste Management in a Decentralized Composting Scenario: Assessment of the Process Reproducibility and Quality of the Obtained Composts**. *Agronomy*, v. 14, n. 1, p. 54, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/1/54>. Acesso em: 6 abril de 2025.

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. **Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review**. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 22, p. 5444-5453, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409006452>. Acesso em: 6 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução **Normativa SDA nº 61, de 8 de julho de 2020**. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos fertilizantes orgânicos e biofertilizantes destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos->

[agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-61-de-8-7-2020-fert-organicos-e-biofertilizantes.pdf](#). Acesso em: 6 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA nº 7, de 12 de abril de 2016**. Altera os Anexos IV e V da Instrução Normativa SDA nº 27, de 5 de junho de 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 abr. 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-7-de-12-4-2016-altera-anexo-in-27-2006.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2025.

BRINTON, W. F.; STORMS, P.; BLEWETT, T. C. **Occurrence and levels of fecal indicators and pathogenic bacteria in market-ready recycled organic matter composts**. *Journal of Food Protection*, v. 75, n. 2, p. 387-395, 2012.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e Enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2010. v. 2, p. 1-65.

CHEN, M.; TONG, Z.; SUN, G.; LI, Q.; ZHANG, X.; YANG, Y. **Effect of compost and chemical fertilizer application on soil microbial community diversity and structure**. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 3, p. 2982-2993, 2020.

DIACONO, M.; MONTEMURRO, F. **Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review**. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 30, n. 2, p. 401-422, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1051/agro/2009040>. Acesso em: 6 abr. 2025.

DIAGNÓSTICO temático: **Manejo de resíduos sólidos urbanos visão geral**. Brasília: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Sistema Nacional de Informações obre Saneamento – SNIS, 2023. 140p. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: 23 de maio de 2024.

EPSTEIN, E. **Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management**. Boca Raton: CRC Press, 2011.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013. 421 p.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management**. 8th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2016.

ISWA, 2024. Global Waste Management Outlook 2024. **Beyond an age of waste: turning rubbish into a resource**. ISBN: 978-92-807-4129-2. Job number: 219/NA. doi: 10 911720 00118224499.

LASARIDI, K. et al. **Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance**. Journal of Environmental Management, v. 80, n. 1, p. 58-65, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705002380>. Acesso em: 6 abr. 2025.

LASARIDI, K.; PROTOPAPA, I.; KOTSOU, M.; PILIDIS, G.; MANIOS, T.; KYRIACOU, A. **Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance**. Journal of Environmental Management, v. 80, n. 1, p. 58-65, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARTÍNEZ-BLANCO, J.; MUÑOZ, P.; ANTÓN, A.; RIERADEVALL, J. **Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops**. Resources, Conservation and Recycling, v. 53, n. 6, p. 340-351, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais. Divisão de População. **World Population Prospects 2024: summary of results**. Nova York: ONU, 2024. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf. Acesso em: 6 abr. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais. Divisão de População. **World Population Prospects 2024: summary of results**. Nova York: ONU, 2024. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf. Acesso em: 6 abr. 2025.

ONWOSI, C. O.; IGBOKWE, V. C.; ODIMBA, J. N.; EKE, I. E.; NWANKWOALA, M. O.; IROH, I. N.; EZEUGU, L. I. **Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects**. *Journal of Environmental Management*, v. 190, p. 140-157, 2017.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 2002. 549 p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

SANTOS, R. H. S.; SILVA, F.; CASALI, V. W. D.; CONDE, A. R. **Conservação pós-colheita de alface cultivada com composto orgânico**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 36, n. 3, p. 521-525, 2001.

Serviço de Limpeza Urbana - SLU. **Relatório anual 2023**. **Serviço de Limpeza Urbana 2023**. Brasília: Serviço de Limpeza Urbana – SLU, 2023. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/documents/d/slu/relatorio-anual-slu-2023>. Acesso em: 05 de maio 2024.

SILVA, F. A. M.; VILLAS BÔAS, R. L.; SILVA, R. B. **Resposta da alface à adubação nitrogenada com diferentes compostos orgânicos em dois ciclos sucessivos**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 32, n. 1, p. 131-137, 2010.

Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos 2019**. Brasília: SINIR, 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 23 mai 2024.

SOUZA, J. L.; RESENDE, P. **Manual de horticultura orgânica**. 3. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2014. 841 p.

TRANI, P. E.; RAIJ, B. van. Hortaliças. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 157-185.

WANG, L.; YANG, L.; LI, Y.; ZHANG, Y.; MA, X.; YE, Z. **Urban food waste composting: A review of process enhancement, environmental impact, and application in agriculture**. Resources, Conservation and Recycling, v. 174, p. 105746, 2021.

YANG, F.; LI, G. X.; YANG, Q. Y.; LUO, W. H. **Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting**. Chemosphere, v. 195, p. 255-265, 2018.

ZHANG, L.; SUN, X.; TIAN, Y.; GONG, X. **Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste**. Bioresource Technology, v. 131, p. 68-75, 2019.

ZHANG, Y. et al. **Comparative study of different representative composting techniques for treating organic waste: Process stability, compost quality, and environmental impacts**. Bioresource Technology, v. 344, p. 126231, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421016527>. Acesso em: 6 abr. 2025.

Capítulo 3

Análise da integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem de podas urbanas

Dahiana Oliveira Ribeiro Rodrigues²

Calebe de Melo Ataides²

Linda de Souza Kour³

Rodrigo Diana Navarro⁴

RESUMO

A integração entre sistemas de aquaponia e compostagem de podas arbóreas urbanas representa uma oportunidade de fechar ciclos de nutrientes e fortalecer a agricultura urbana sustentável. Este estudo investigou a viabilidade do uso de água residuária aquapônica como insumo para enriquecer compostos de poda antes do cultivo, avaliando o impacto nutricional do substrato e os ganhos produtivos em manjerição (*Ocimum basilicum* L.) como bioindicador. O experimento foi conduzido em duas fases no Distrito Federal: enriquecimento do composto com quatro doses de água aquapônica (0 a 400 mL/dia por 30 dias) e cultivo vegetal por 45 dias nos substratos resultantes. Neste estudo buscou-se a identificação da “dose operacional ótima”: o agricultor que enriquecer o composto de poda com 200 mL de água residuária aquapônica por vaso ao dia, durante 30 dias antes do plantio, e pode obter em um incremento de 31,2% no número de folhas e 21,3% na biomassa fresca da parte aérea, ainda um aumento de 21,4% no diâmetro do caule e 10,2% no peso total. Essa dose — denominada T3 — produziu o substrato com melhor relação C/N (13,03), dentro da faixa ideal para uso agrônômico (10–15), com foco no aproveitamento eficiente do efluente e máximo retorno produtivo. O resultado destaque no enriquecimento foi a possível mineralização do fósforo orgânico no composto, resultando em incremento de 54% no teor de P_2O_5 (T4 vs T1), sem aporte direto do nutriente pela água. Todos os compostos enriquecidos atenderam integralmente aos

²UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

requisitos do MAPA para registro como Fertilizante Orgânico Composto Classe A e Condicionador de Solo Classe A. Conclui-se que a integração aquaponia-compostagem é tecnicamente viável, regulatoriamente respaldada e aplicável em sistemas urbanos de produção de alimentos, oferecendo ao agricultor urbano um protocolo executável para transformar dois resíduos em um insumo produtivo certificado.

Palavras-chave: compostagem, aquaponia, economia circular, cidades sustentáveis, agricultura urbana.

ABSTRACT

The integration of aquaponic systems with urban tree pruning composting represents a concrete opportunity to close nutrient cycles and strengthen sustainable urban agriculture. This study evaluated the feasibility of using aquaponic wastewater as an input to enrich pruning compost prior to cultivation, assessing its nutritional impact on the substrate and productivity responses in basil (*Ocimum basilicum* L.) as a bioindicator species. The experiment was conducted in two phases in the Federal District, Brazil: compost enrichment with four doses of aquaponic water (0 to 400 mL/day for 30 days), followed by a 45-day cultivation period using the resulting substrates. The study aimed to identify an operationally recommended application rate. Enrichment with 200 mL/day per pot for 30 days (T3) resulted in increases of 31.2% in leaf number, 21.3% in fresh shoot biomass, 21.4% in stem diameter, and 10.2% in total plant weight compared to the non-enriched substrate. This treatment also produced the most balanced C/N ratio (13.03), within the ideal agronomic range (10–15), optimizing effluent use efficiency and productive return. A notable finding was the likely mineralization of organic phosphorus within the compost, leading to a 54% increase in P_2O_5 content (T4 vs. T1), without direct phosphorus input from the wastewater. All enriched composts fully complied with Brazilian Ministry of Agriculture (MAPA) requirements for registration as Class A Organic Compound Fertilizer and Class A Soil Conditioner. The results demonstrate that aquaponics–composting integration is technically feasible, regulatorily supported, and applicable to urban food production systems, providing urban farmers with an executable protocol to convert two waste streams into a certified productive input.

Keywords: composting, aquaponics, circular economy, sustainable cities, urban agriculture.

RESUMEN

La integración entre sistemas de acuaponía y el compostaje de podas arbóreas urbanas representa una oportunidad concreta para cerrar ciclos de nutrientes y fortalecer la agricultura urbana sostenible. Este estudio evaluó la viabilidad del uso de agua residual acuapónica como insumo para enriquecer compost de poda antes del cultivo, analizando su impacto nutricional en el sustrato y las respuestas productivas en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) como especie bioindicadora. El experimento se realizó en dos fases en el Distrito Federal, Brasil: enriquecimiento del compost con cuatro dosis de agua acuapónica (0 a 400 mL/día durante 30 días), seguido de un período de cultivo de 45 días utilizando los sustratos resultantes. El estudio buscó identificar una dosis operacional recomendada. El tratamiento con 200 mL/día por maceta durante 30 días (T3) generó incrementos de 31,2% en el número de hojas, 21,3% en la biomasa fresca aérea, 21,4% en el diámetro del tallo y 10,2% en el peso total de las plantas en comparación con el sustrato sin enriquecimiento. Este tratamiento también presentó la relación C/N más equilibrada (13,03), dentro del rango ideal agronómico (10–15), optimizando el uso del efluente y el retorno productivo. Un resultado destacado fue la probable mineralización del fósforo orgánico en el compost, con un incremento del 54% en el contenido de P_2O_5 (T4 vs. T1), sin aporte directo del nutriente por el agua residual. Todos los compost enriquecidos cumplieron plenamente los requisitos del MAPA para su registro como Fertilizante Orgánico Compuesto Clase A y Acondicionador de Suelo Clase A. Se concluye que la integración acuaponía–compostaje es técnicamente viable, cuenta con respaldo regulatorio y es aplicable a sistemas urbanos de producción de alimentos, ofreciendo a los agricultores urbanos un protocolo ejecutable para transformar dos residuos en un insumo productivo certificado.

Palabras clave: compostaje, acuaponía, economía circular, ciudades sostenibles, agricultura urbana.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos representa um dos maiores desafios contemporâneos, com projeções que indicam um crescimento expressivo na geração de resíduos nas próximas décadas. Deste montante, aproximadamente 55% correspondem à fração orgânica, cuja gestão tradicional não apenas demanda recursos financeiros significativos, como também gera impactos ambientais consideráveis (KAZA et al., 2018). Neste contexto, a recuperação dos nutrientes presentes nesses resíduos emerge como uma estratégia fundamental para reduzir a dependência de fertilizantes minerais, cuja extração intensifica a exploração de recursos naturais não renováveis (BABCOCK-JACKSON et al., 2023).

A implementação de práticas inovadoras na gestão de resíduos orgânicos, alinhadas aos princípios da economia circular, apresenta oportunidades para transformar o que tradicionalmente seria descartado em recursos valiosos para a sociedade. No Distrito Federal (DF), observa-se um movimento crescente nesta direção, com empresas de pequeno e médio porte já operando na conversão de resíduos em compostos orgânicos. Paralelamente, iniciativas descentralizadas em condomínios e instituições de ensino têm demonstrado o potencial para se tornar uma prática de economia circular. (IPEDF CODEPLAN, 2023).

Neste cenário, emerge uma possibilidade promissora: a integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem, especificamente no aproveitamento da água residuária rica em nitrogênio proveniente da aquaponia para a rega de compostagem de podas urbanas. Esta abordagem apresenta particular relevância considerando que o material de poda, embora rico em carbono, apresenta deficiência em nitrogênio. A integração destes sistemas pode representar um avanço significativo no fechamento de ciclos de nutrientes, fortalecendo a implementação de princípios de economia circular no contexto urbano (MEDEIROS et al, 2010).

A sinergia entre aquaponia e compostagem se estabelece de maneira complementar: enquanto a compostagem de poda produz um condicionador de solo com elevado teor de carbono, a incorporação da água residuária da aquaponia, rica em nitrogênio, pode enriquecer nutricionalmente o composto final, potencializando suas propriedades como fertilizante orgânico.

Para investigar esta hipótese e avaliar a viabilidade do uso da água residuária da aquaponia como fonte de nitrogênio na compostagem de podas urbanas, realizou-

se um estudo experimental. O presente estudo busca responder à seguinte questão central: "Em que medida a água residuária da aquaponia pode suprir as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas urbanas, resultando em um composto orgânico nutricionalmente equilibrado?"

Assim, o presente estudo foi uma pesquisa experimental de caráter quantitativo, conduzida com o objetivo de investigar o potencial nutricional da integração entre sistemas de aquaponia e processos de compostagem de podas urbanas.

2 METODOLOGIA

O experimento (fase 1) foi conduzido no sistema aquapônico da Associação Brasileira de Assistência As Famílias de Crianças Portadoras de Câncer e Hemopatias (ABRACE), localizada no Distrito Federal. O sistema aquapônico utilizado consiste em um tanque de 200 litros de criação com capacidade para 20 tilápias (*Oreochromis niloticus*) e módulos de cultivo hidropônico em telhas com hortelã (*Mentha spicata*), operando em ciclo fechado de recirculação de água.



Figura 1 – Sistema aquapônico utilizado no experimento

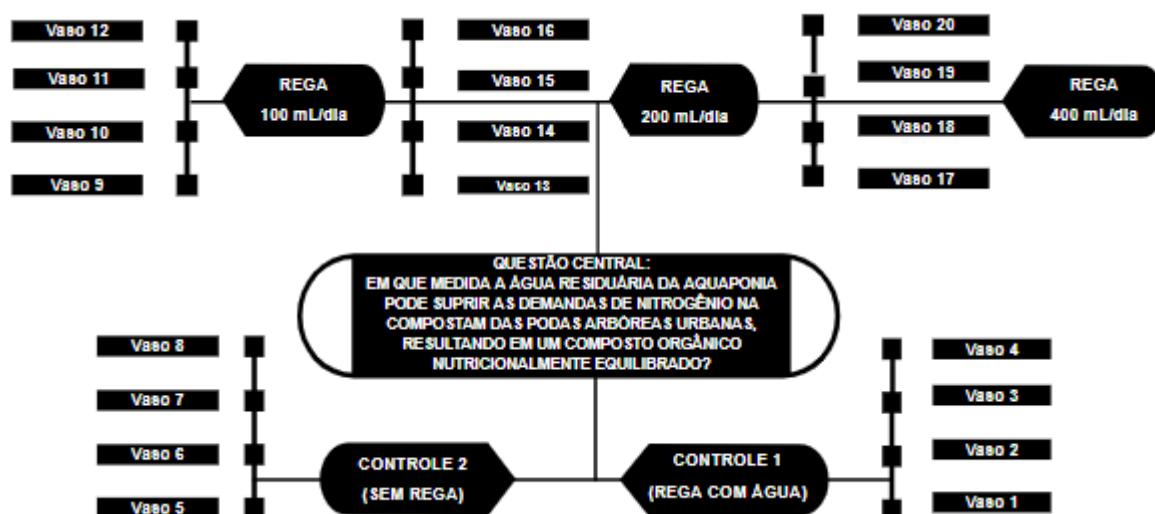


Figura 2 – Delineamento experimental das repetições e controles de regas

A eficácia da água residuária aquapônica no desenvolvimento vegetal encontra respaldo científico na literatura. Este estudo seguiu a metodologia adaptada de Medeiros et al. (2010), em estudo experimental com delineamento inteiramente casualizado similar ao presente trabalho, demonstraram que o efluente de piscicultura proporcionou maior número de folhas e comprimento da raiz em mudas de meloeiro quando comparado à irrigação com água de poço comum.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC - Delineamento Inteiramente Casualizado), seguindo a metodologia adaptada de Danaher et al (2013), composto por cinco tratamentos com quatro repetições cada, totalizando 20 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em diferentes frequências de rega do composto de poda com água residuária aquapônica, conforme descrito a seguir:

- **Tratamento 0 (T0):** Controle positivo - rega diária com água comum (200 mL/dia) - vasos 1, 2, 3 e 4
- **Tratamento 1 (T1):** Controle negativo - sem rega (vasos 5, 6, 7 e 8)
- **Tratamento 2 (T2):** Rega diária com água residuária aquapônica (100 mL/dia) - vasos 9, 10, 11 e 12
- **Tratamento 3 (T3):** Rega diária com água residuária aquapônica (200 mL/dia) - vasos 13, 14, 15 e 16
- **Tratamento 4 (T4):** Rega diária com água residuária aquapônica (400 mL/dia) - vasos 17, 18, 19 e 20



Figura 3 – Unidades experimentais (Fase 1)

Esta configuração experimental permite separar os efeitos nutricionais (comparando T2, T3, T4 com T0) dos efeitos da disponibilidade hídrica (comparando T0 com T1), além de estabelecer uma relação dose-resposta para otimização dos volumes de aplicação

Para a condução das unidades experimentais, foram utilizados 20 vasos de cultivo modelo pote nº 15 (1 litro) distribuídos conforme o delineamento experimental estabelecido na figura 1. A padronização das aplicações de água residuária aquapônica foi assegurada mediante o uso de copos graduados de 100 mL para medição precisa dos volumes de rega. O armazenamento da água residuária coletada do sistema aquapônico foi realizado em bombonas.

O composto de poda urbana utilizado como substrato base foi obtido a partir de material de poda arbórea coletado no Distrito Federal, previamente submetido a processo de compostagem até atingir estabilidade. O material foi peneirado (4mm) e homogeneizado antes da distribuição nos vasos experimentais.

A água residuária aquapônica foi coletada em manutenções do sistema de recirculação, sendo armazenada em bombonas adequadas para posterior aplicação nos tratamentos. A água residuária aquapônica inicial foi caracterizada quanto aos teores de nitrogênio total, nitrato, nitrito, amônia, fósforo total, potássio, pH e condutividade elétrica antes da aplicação, permitindo quantificar as diferenças nutricionais entre os tratamentos.

Esta fase experimento foi conduzida durante o período de estiagem (agosto/setembro), estrategicamente selecionado por representar condições

climáticas de baixa umidade relativa e temperaturas estáveis, fatores que favorecem o controle das variáveis ambientais e a padronização dos procedimentos experimentais. **A duração total do estudo foi estabelecida em 75 dias**, estruturados em **duas fases experimentais** distintas e complementares, cada uma com objetivos específicos e metodologias apropriadas para a obtenção de dados relevantes.

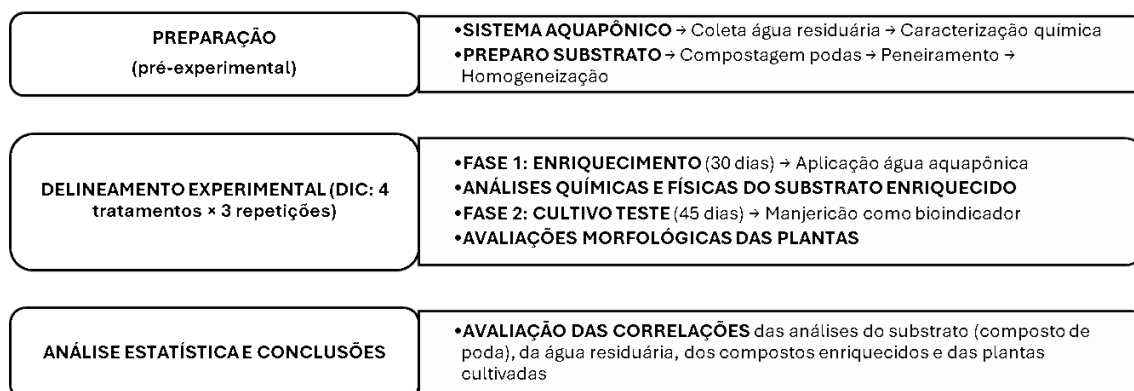


Figura 4 – Delineamento e fases do experimento

A primeira fase experimental, chamada de fase 1 - enriquecimento do substrato em 30 dias, foi dedicada ao processo de enriquecimento nutricional do substrato de compostagem através da aplicação controlada de água residuária aquapônica. Durante este período, foi realizada a aplicação diária dos volumes específicos estabelecidos para cada tratamento: 200 mL de água comum (T0), nenhuma aplicação (T1), e 100, 200 ou 400 mL de água residuária aquapônica (T2, T3 e T4, respectivamente).

Foi implementado um protocolo de revolvimento periódico do composto, realizado semanalmente, com o objetivo de promover a homogeneização adequada da distribuição da água residuária aplicada, favorecer a aeração do material orgânico e estimular a atividade microbiana responsável pelos processos de decomposição e estabilização da matéria orgânica (TIQUIA et al., 2002; ZHAO et al., 2022; WU et al., 2023). Este procedimento também contribuiu para prevenir a formação de zonas anaeróbicas indesejáveis e garantir a distribuição uniforme dos nutrientes provenientes da água aquapônica em toda a massa do substrato.

Ao final da fase de enriquecimento, foram coletadas amostras de substrato de cada unidade experimental para análise laboratorial dos seguintes parâmetros:

nitrogênio total, fósforo, potássio, carbono orgânico total, relação C/N; pH e matéria orgânica total.

2.1 Delineamento Experimental da Fase 2

A segunda fase experimental, **Fase 2 - cultivo teste de 45 dias**, foi concebida para avaliar o **efeito residual do enriquecimento prévio dos substratos** sobre o desenvolvimento vegetal através do cultivo de plantas bioindicadoras. Para esta finalidade, foram utilizadas mudas padronizadas de manjerição (*Ocimum basilicum*), espécie selecionada por sua reconhecida sensibilidade às variações nutricionais do meio de cultivo e sua capacidade de resposta rápida às diferentes condições de disponibilidade de nutrientes. A escolha desta espécie baseou-se em sua ampla utilização em estudos de avaliação de substratos orgânicos, bem como em sua resposta diferencial aos teores de nitrogênio disponível, característica fundamental para os objetivos do presente estudo.

As mudas utilizadas foram obtidas por propagação vegetativa (estaquia), método que garante uniformidade genética das plantas e elimina a variabilidade associada a diferenças entre cultivares ou lotes de sementes distintos. As estacas foram selecionadas a partir de plantas-mãe com características morfológicas uniformes em termos de altura e número de folhas antes do transplântio. Reconhece-se, contudo, que mesmo com padronização por estaquia, pode haver variabilidade residual entre indivíduos associada a diferenças no enraizamento e vigor inicial, fator que foi considerado na interpretação dos resultados, especialmente nos parâmetros com maior dispersão entre repetições.

A Fase 2 empregou delineamento inteiramente casualizado (DIC) com cinco tratamentos e cinco repetições, totalizando 25 unidades experimentais, com mudas em estaca de 15 cm. Os tratamentos corresponderam aos cinco substratos resultantes da Fase 1, cada um com histórico distinto de enriquecimento durante o período de 30 dias:

- **T0:** Substrato controle positivo (recebeu rega diária com água comum 200 mL durante Fase 1)
- **T1:** Substrato controle negativo (sem rega durante Fase 1)
- **T2:** Substrato enriquecido com água aquapônica 100 mL/dia durante Fase 1

- **T3:** Substrato enriquecido com água aquapônica 200 mL/dia durante Fase 1
- **T4:** Substrato enriquecido com água aquapônica 400 mL/dia durante Fase 1



Figura 5 – Cultivo teste (45 dias)

Optou-se por padronizar a irrigação na Fase 2, aplicando-se **200 mL de água residuária aquapônica diariamente em todos os tratamentos**. Esta abordagem metodológica foi adotada para **simular condições reais de produção agrícola**, nas

quais o produtor rural ou urbano utiliza uma única fonte de água para irrigação de seus cultivos, independentemente do histórico de enriquecimento do substrato utilizado.

O volume de irrigação foi padronizado com base em critérios metodológicos consolidados na literatura: **(i) representa o ponto intermediário dos volumes testados** na Fase 1 (100, 200 e 400 mL/dia), permitindo avaliação adequada da relação dose-resposta conforme recomendado em estudos de design experimental (HOTHORN, 2016; PUKELSHEIM; RIEDER, 1992); **(ii) mantém a umidade do substrato na faixa ótima (60-80% da capacidade de campo)** documentada como ideal para o cultivo de manjerição (KIM et al., 2020; IMAKUMBILI, 2019) EKREN et al., 2012).

Esta configuração experimental permite isolar e avaliar especificamente o **efeito residual do enriquecimento prévio** (Fase 1) sobre o desenvolvimento vegetal, respondendo à seguinte questão de pesquisa aplicada: *"Substratos enriquecidos com diferentes doses de água aquapônica mantêm diferenças nutricionais suficientes para influenciar a produtividade vegetal quando submetidos a um regime de irrigação uniforme?"*

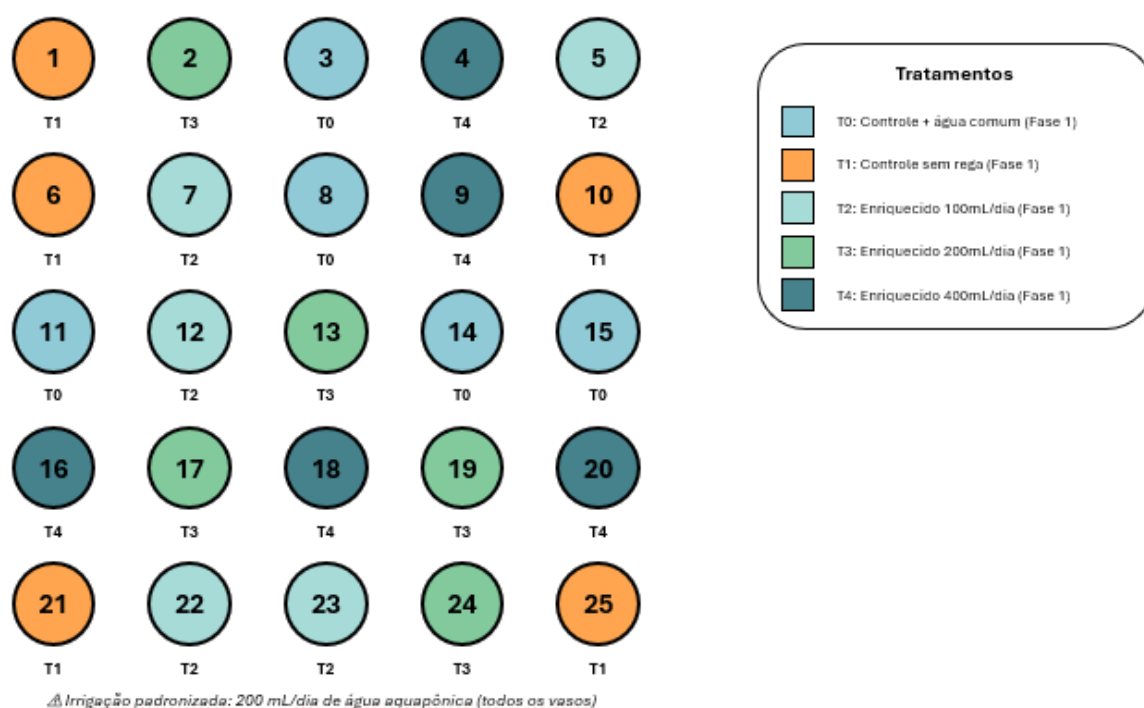


Figura 6. Delineamento experimental da Fase 2 (cultivo teste). (A) Distribuição espacial das 25 unidades experimentais em arranjo inteiramente casualizado (DIC), mostrando os cinco tratamentos com históricos distintos de enriquecimento: T0 (controle positivo - rega com água comum durante Fase

1), T1 (controle negativo - sem rega durante Fase 1), T2 (enriquecido 100 mL/dia), T3 (enriquecido 200 mL/dia) e T4 (enriquecido 400 mL/dia). Todos os vasos receberam irrigação padronizada com 200 mL/dia de água residuária aquapônica durante o cultivo de manjerição.

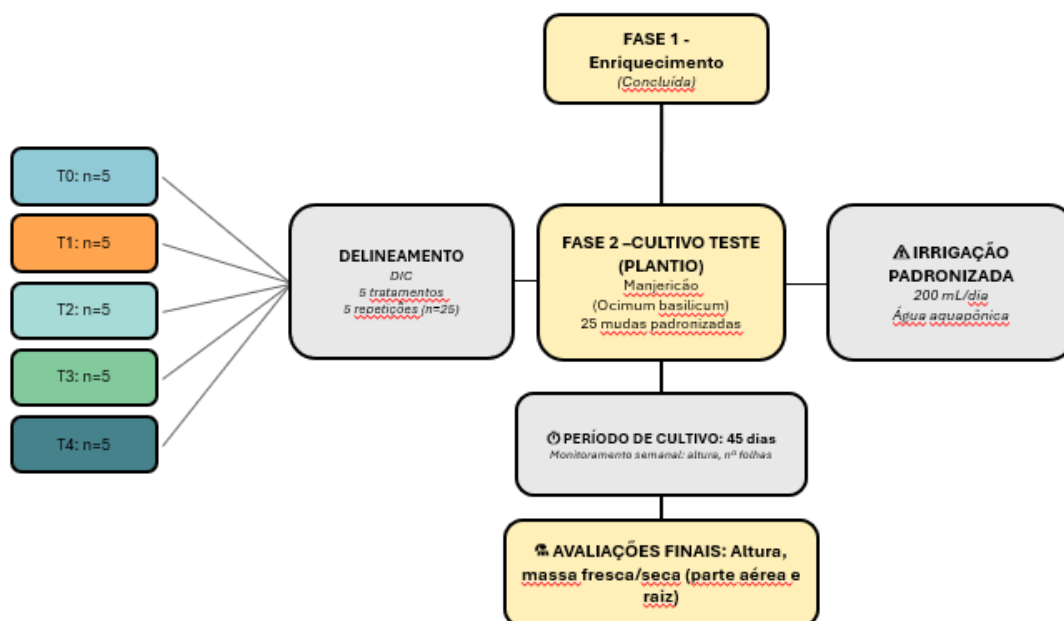


Figura 7 - Fluxograma metodológico da Fase 2, ilustrando a sequência desde os substratos resultantes da Fase 1, passando pelo plantio de mudas padronizadas de manjerição (*Ocimum basilicum*), aplicação da irrigação padronizada, período de cultivo de 45 dias com monitoramento semanal, até as avaliações finais de altura e massas fresca e seca

O plantio das mudas foi realizado de forma simultânea em todas as unidades experimentais, utilizando exemplares com características morfológicas similares em termos de altura (15 cm), número de folhas (máximo 2) e desenvolvimento radicular, garantindo assim a uniformidade das condições iniciais e a comparabilidade dos resultados obtidos. Cada vaso experimental (pote nº 11 - 500ml) recebeu uma única muda, posicionada centralmente no substrato correspondente ao seu tratamento específico.

Durante todo o período de cultivo (30 dias), foi implementado um programa de monitoramento sistemático do desenvolvimento vegetativo das plantas através de avaliações semanais da altura da planta. Este acompanhamento permitiu a observação da evolução temporal do crescimento das plantas em resposta aos diferentes históricos de enriquecimento nutricional dos substratos, fornecendo dados essenciais para a posterior análise estatística e interpretação dos resultados.

Ao final do período de cultivo, as plantas de manjerição foram coletadas para determinação dos seguintes parâmetros de avaliação final:

- Altura da planta (cm)
- Massa fresca parte aérea e radicular (g)
- Massa seca parte aérea e radicular (g)
- Relação parte aérea/raiz
- Diâmetro Caule (mm)
- N° Folhas
- Compr. Raiz Principal (cm)
- Peso total (g)



Figura 8 – Cultivo teste (45 dias)

A caracterização física dos compostos produzidos foi realizada através da análise granulométrica por peneiramento, seguindo a metodologia estabelecida pela NBR 7181:2016 (ABNT, 2016), adaptada para materiais orgânicos compostados conforme procedimentos descritos por Donagemma et al. (2017).

A metodologia experimental adotada por Medeiros et al. (2010), utilizando delineamento inteiramente casualizado com análise de parâmetros morfológicos vegetais, alinha-se estrategicamente com a abordagem metodológica do presente estudo, reforçando a validade da utilização de plantas bioindicadoras para avaliar a eficiência de sistemas aquapônicos integrados.

A tabela 1 apresenta as análises físico-químicas das fases do experimento:

- Caracterização da água residuária antes do uso para rega nos experimentos;
- Análise laboratorial do substrato depois do enriquecimento;
- Avaliações das plantas “material vegetal”;

Tabela 1 – Análises laboratoriais das fases do experimento

Caracterização da água residuária (inicial)	Análises do substrato antes e depois o enriquecimento	Avaliações das plantas “material vegetal” (dia 60)
Análises químicas: Nitrogênio total (mg/L) Nitrato (NO_3^-) (mg/L) Nitrito (NO_2^-) (mg/L) Amônia/Amônio ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) (mg/L) Fósforo total (mg/L) Potássio (mg/L) pH e condutividade elétrica DBO_5 Metais pesados (Pb, Hg, Cr, As, Ni, Cd) Coliformes termotolerantes Salmonella sp.	Análises químicas: Umidade (60-65°C) (%) pH (CaCl_2) Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Nitrogênio total (%) Carbono orgânico (%) Relação C/N CTC (mmolc/kg) Macronutrientes: P, K, Ca, Mg, S (g/kg) Micronutrientes: Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo (mg/kg) Metais pesados (mg/kg) Coliformes termotolerantes (NMP/g MS) Salmonella sp. (ausência em 10g MS) Classificação textural (areia, silte e argila)	Parâmetros morfológicos: Altura da planta (cm) Massa fresca parte aérea e radicular (g) Massa seca parte aérea e radicular (g) Relação parte aérea/raiz Diâmetro Caule (mm) N° Folhas Compr. Raiz Principal (cm) Peso total (g)

As duas fases foram conduzidas **sequencialmente**, com a Fase 2 iniciando imediatamente após a conclusão da Fase 1, utilizando o substrato enriquecido resultante do melhor tratamento. Assim, o experimento completo utilizou **45 unidades experimentais** (20 da Fase 1 + 25 da Fase 2).

1 RESULTADOS

1.1 FASE 1 – ENRIQUECIMENTO DO SUBSTRATO

Ao final do período de enriquecimento, o substrato de cada tratamento foi homogeneizado e uma amostra composta representativa foi enviada para análise química de fertilizantes no Laboratório Soloquímica (Brasília-DF), seguindo metodologia oficial do MAPA (Portaria SDA/MAPA nº 1.110/2024).

Tabela 2. Resultado da análise laboratorial do substrato enriquecido durante 30 dias por tratamento T0 a T4

Descrição		T 0 - REGA ÁGUA	T1 - SEM REGA	T 2 - 100ML/DIA	T 3 - 200ML/DIA	T 4 - 400ML/DIA
Parâmetro	Unid.	Base Natural	Base Natural	Base Natural	Base Natural	Base Natural
Nitrogênio (N Total)	%	1,75	1,4	1,4	1,4	1,75
Fósforo (P ₂ O ₅ Total)	%	0,88	0,76	0,84	0,94	1,17
Potássio (K ₂ O Sol. H ₂ O)	%	< LQ	0,25	0,22	0,11	< LQ
Cálcio (Ca Total)	%	2,17	1,9	1,7	1,97	1,68
Magnésio (Mg Total)	%	0,11	0,14	0,11	0,1	0,1
Enxofre (S - SO ₄)	%	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Boro (Total)	mg/Kg	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cobre (Cu Total)	mg/Kg	8,65	7,24	6,69	6,47	6,62
Ferro (Fe Total)	mg/Kg	25,12	2,71	17,77	20,70	19,98
Manganês (Mn Total)	mg/Kg	132,74	115,36	123,67	116,4	105,51
Zinco (Zn Total)	mg/Kg	34,48	26,81	22,94	22,6	23,25
Carbono Orgânico (CO)	%	27,12	21,36	22,56	18,24	24,48
Capacidade de Trocar Cátions (CTC)	mmolc/ Kg	1110	1080	1040	1095	1045
Relação CTC/C Orgânico	--	40,93	50,56	46,1	60,03	42,69
Relação C/N	--	15,5	15,26	16,11	13,03	13,99
pH CaCl ₂	--	7	7	7,1	7,3	7,5
Coliformes Termotolerantes	NMP/g MS	na	na	na	na	18
Salmonella spp.		na	na	na	na	Ausência
Selênio (Se Total)	mg/Kg	na	na	na	na	< LQ
Níquel (Ni Total)	mg/Kg	na	na	na	na	< LQ
Arsênio (As Total)	mg/Kg	na	na	na	na	< LQ
Mercúrio (Hg Total)	mg/Kg	na	na	na	na	< LQ
Cádmio (Cd Total)	mg/Kg	na	na	na	na	< LQ
Chumbo (Pb Total)	mg/Kg	na	na	na	na	< LQ
Cromo (Cr Total)	mg/Kg	na	na	na	na	33,11

As Figuras abaixo apresentam a **análise dose-resposta** dos principais parâmetros químicos do substrato em função do volume de água residuária aquapônica aplicado durante o período de enriquecimento."

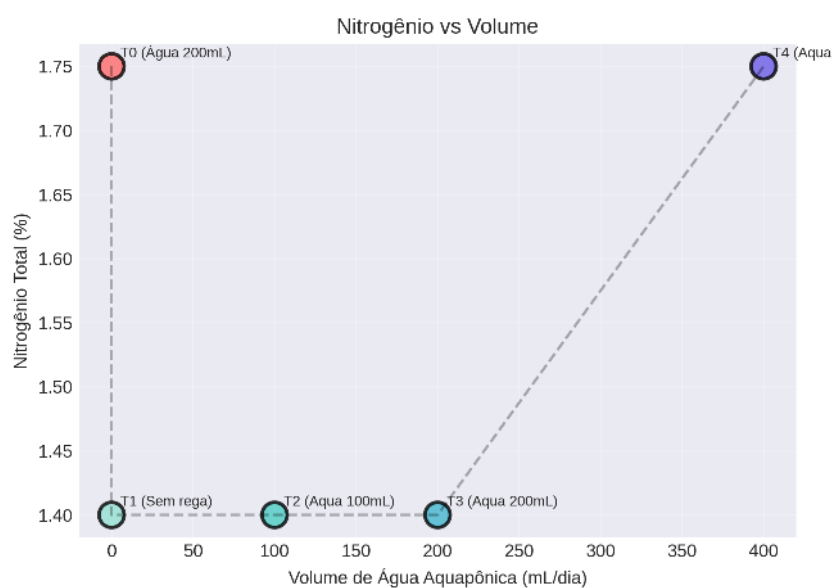


Figura 9 - Análise dose-resposta do efeito do volume de água residuária aquapônica sobre parâmetros químicos do substrato de compostagem - teor de nitrogênio total.

O nitrogênio manteve-se estável nos tratamentos T2 e T3 (1,40%), com aumento de 25% no T4 (1,75%).

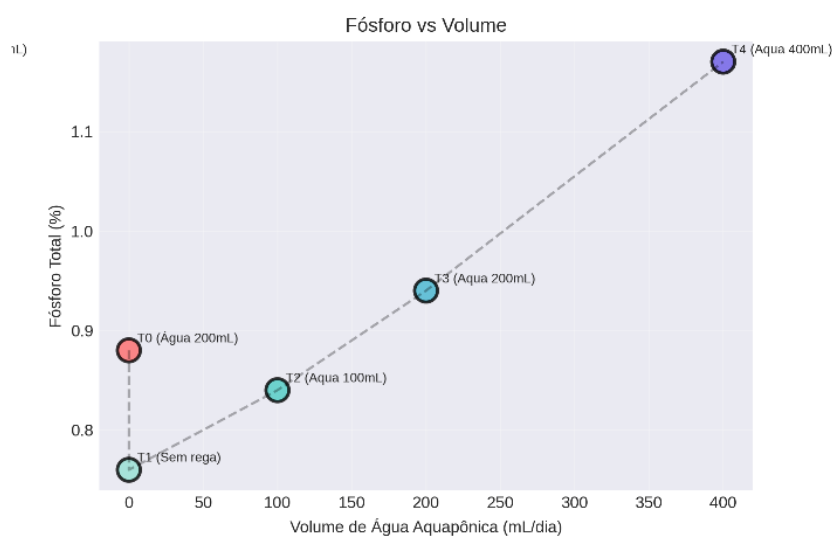


Figura 10 - Análise dose-resposta do efeito do volume de água residuária aquapônica sobre parâmetros químicos do substrato de compostagem - teor de fósforo total (P_2O_5).

O teor de P_2O_5 apresentou resposta linear crescente, variando de 0,76% (T1) a 1,17% (T4), representando incremento de 33% em relação ao controle positivo (T0: 0,88%). Considerando que a água aquapônica apresentou teor de fósforo inferior a 1

mg/L, o enriquecimento observado não se deve ao aporte direto deste nutriente, mas sim ao efeito catalítico do nitrogênio sobre a mineralização do fósforo orgânico.

O comportamento divergente entre N e P evidencia a complexidade da dinâmica de nutrientes em sistemas integrados aquaponia-compostagem. Enquanto o P apresentou resposta dose-dependente clara (+54%), o N permaneceu estável (1,40-1,75%) devido a múltiplas vias de perda (volatilização em pH > 7,3, lixiviação de nitratos, imobilização microbiana e possível desnitrificação). A diminuição da relação C/N em T3 e T4 (13,03-13,99) demonstra que houve enriquecimento em N, porém em formas mais estáveis e mineralizadas.

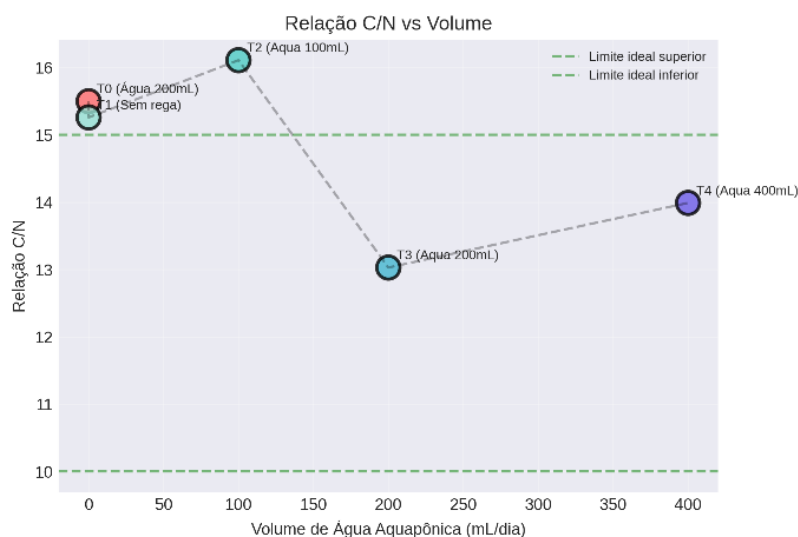


Figura 11 - Análise dose-resposta do efeito do volume de água residuária aquapônica sobre parâmetros químicos do substrato de compostagem - relação carbono/nitrogênio.

A relação C/N reduziu com o aumento da dose, com T3 e T4 apresentando valores dentro da faixa ideal (10-15): 13,03 e 13,99, respectivamente. O pH aumentou linearmente de 7,0 (T0/T1) a 7,5 (T4).

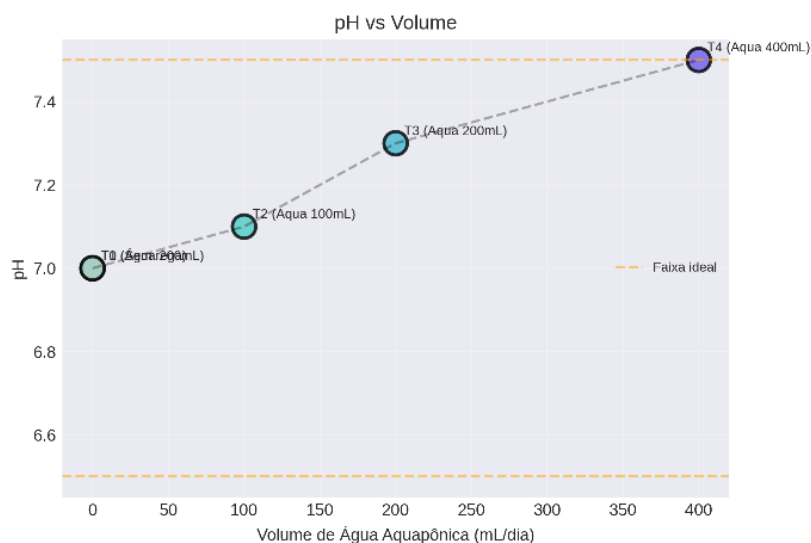


Figura 12 - Análise dose-resposta do efeito do volume de água residuária aquapônica sobre parâmetros químicos do substrato de compostagem - pH do substrato.

As figuras abaixo apresentam **análise comparativa dos parâmetros químicos** determinados nos substratos após 30 dias de enriquecimento com diferentes volumes de água residuária aquapônica.

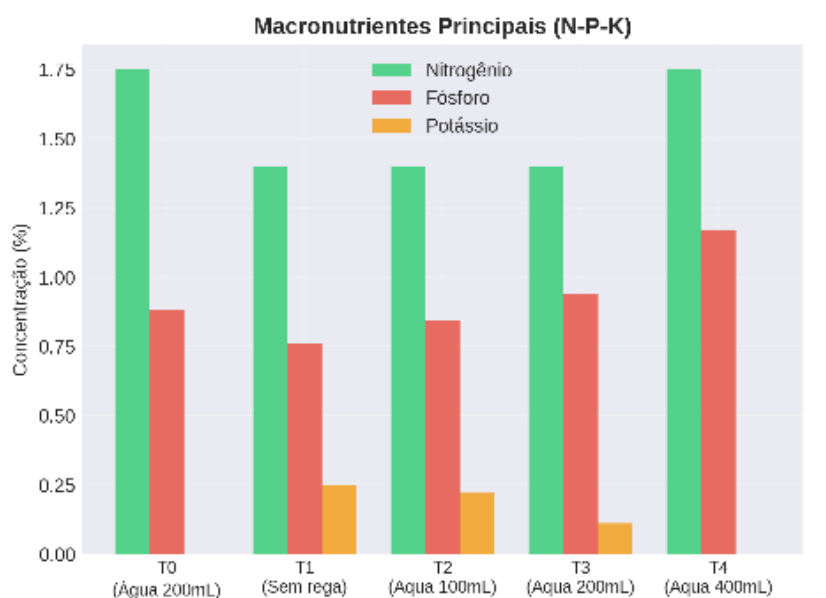


Figura 13. Análise comparativa dos parâmetros químicos dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica. - Perfil de macronutrientes principais (N-P-K);

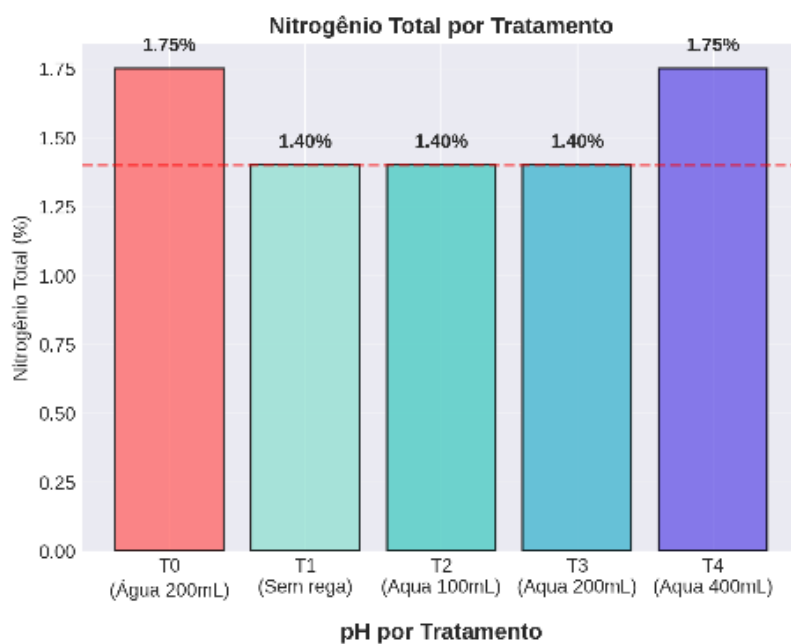


Figura 14. Análise comparativa dos parâmetros químicos dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica - **teor de nitrogênio total**.

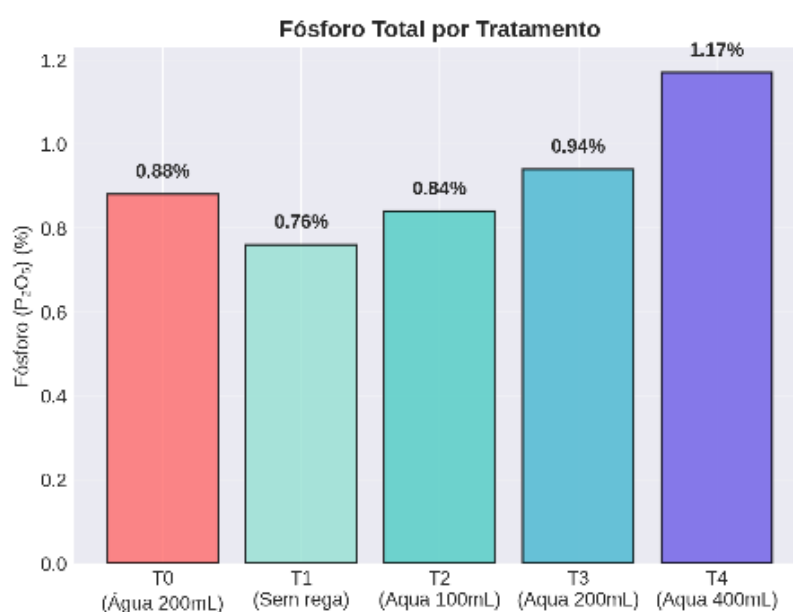


Figura 15. Análise comparativa dos parâmetros químicos dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica - **teor de fósforo total (P₂O₅)**;

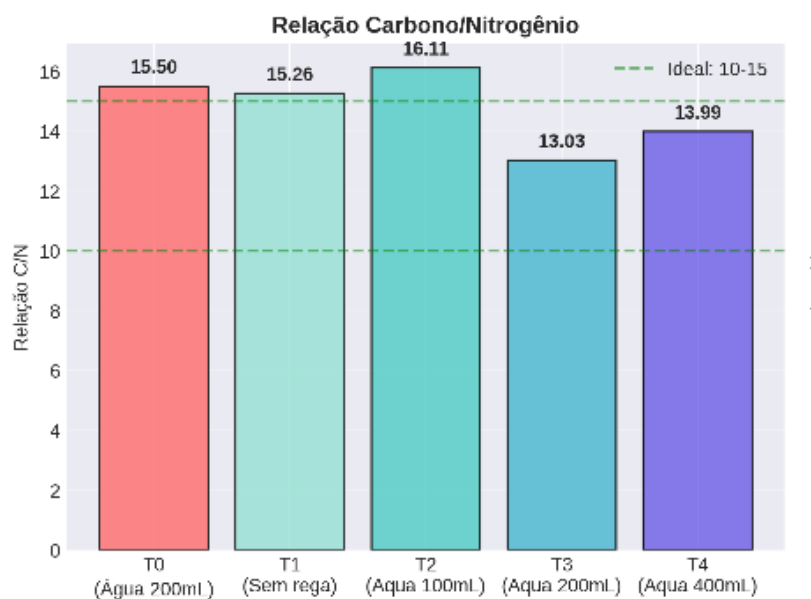


Figura 16. Análise comparativa dos parâmetros químicos dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica - **relação carbono/nitrogênio**;

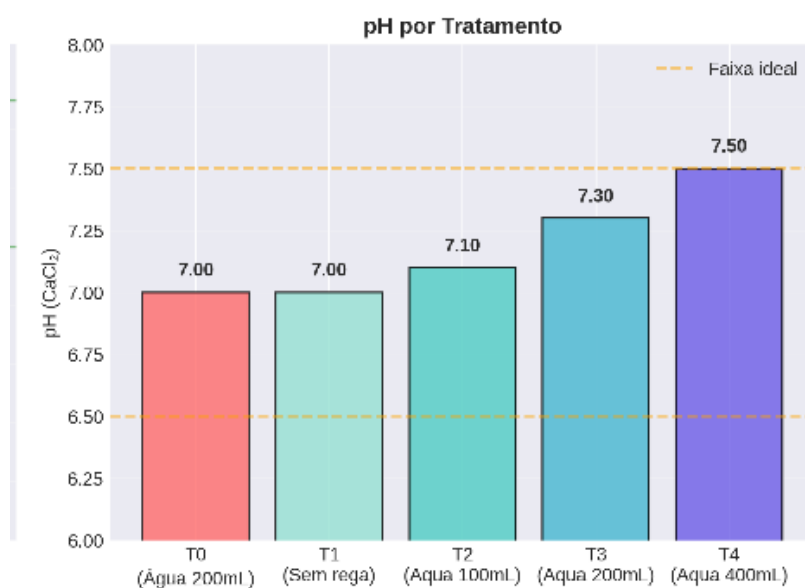


Figura 17. Análise comparativa pH dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica; linhas tracejadas indicam faixa ideal de pH.

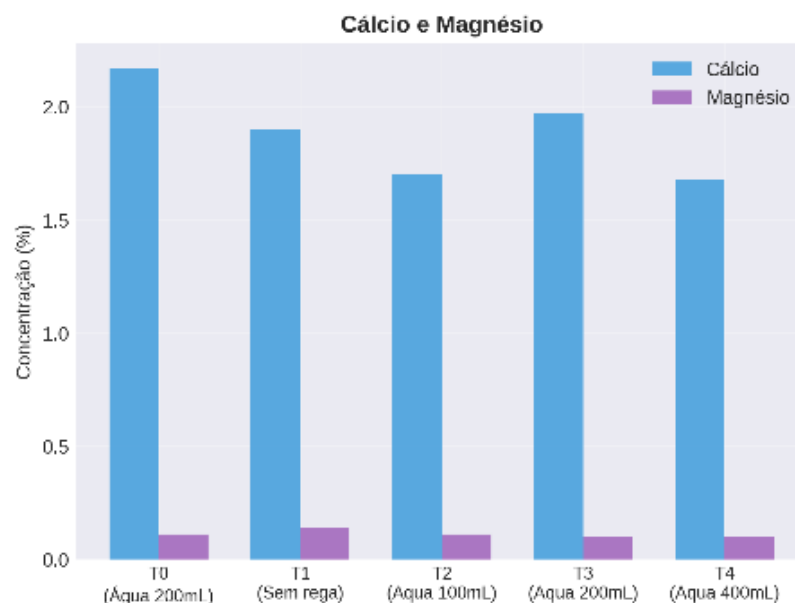


Figura 18. Análise comparativa dos **teores de cálcio e magnésio** dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica.

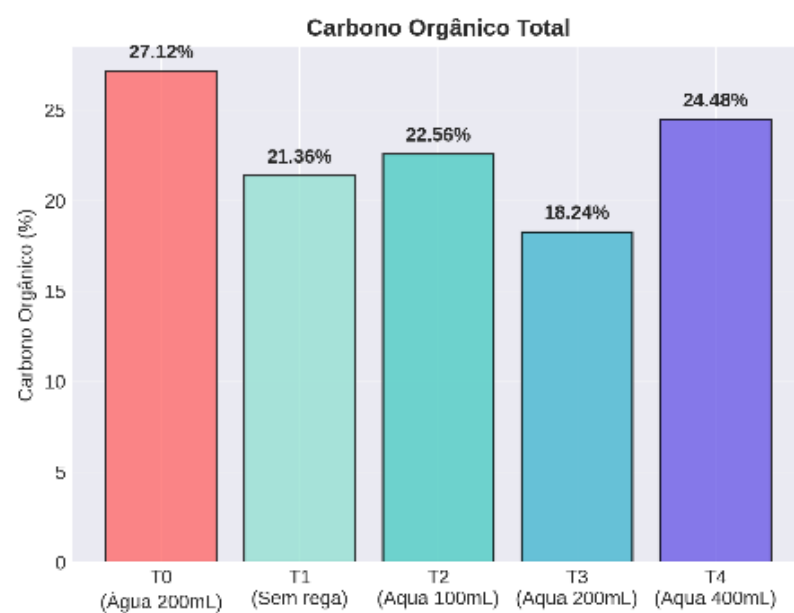


Figura 19. Análise comparativa de carbono orgânico total dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica.

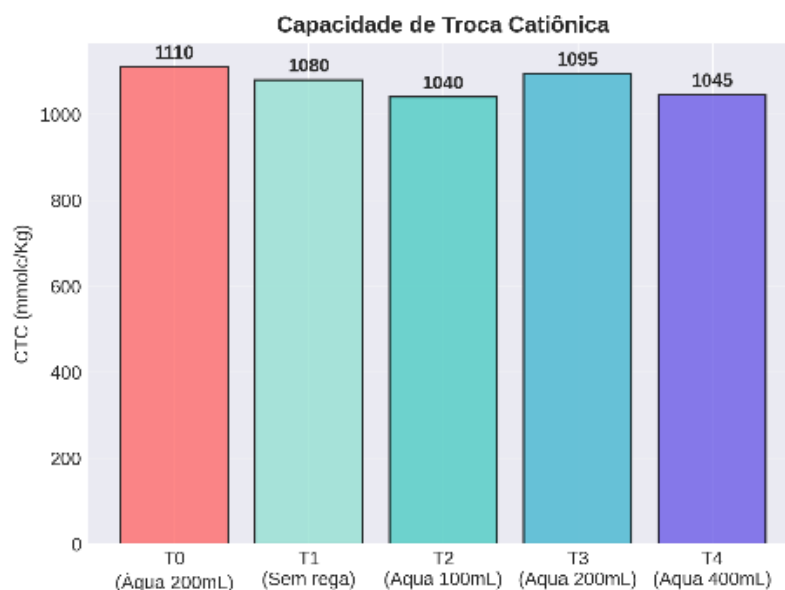


Figura 20. Análise comparativa de capacidade de troca catiônica dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica.

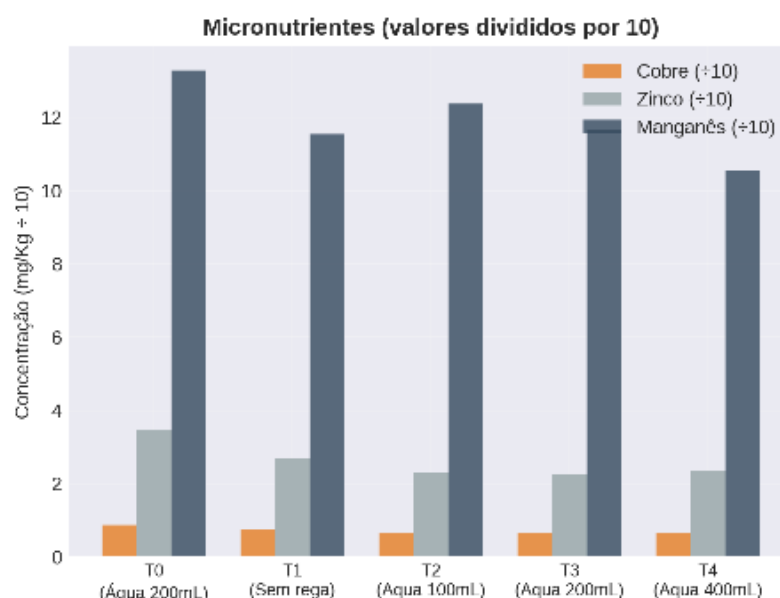


Figura 21. Análise comparativa dos micronutrientes (Cu, Zn, Mn) dos substratos de compostagem enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica; valores divididos por 10 para visualização)

Observa-se que o **nitrogênio** foi o nutriente mais abundante em todos os tratamentos (valores entre 1,40-1,75%), seguido pelo **fósforo** (0,76-1,17%).

O **potássio** apresentou teores muito baixos ou abaixo do limite de quantificação em T0 e T4, sugerindo que a água aquapônica não foi efetiva no enriquecimento deste nutriente, possivelmente devido aos baixos teores iniciais na

água residuária e à **elevada solubilidade e mobilidade do K^+** , que pode ter sido **lixiviado** durante as irrigações.

O **teor de nitrogênio** apresentou dois patamares distintos: tratamentos T1, T2 e T3 com 1,40%, e tratamentos T0 e T4 com 1,75%, representando **incremento de 25% em relação aos tratamentos intermediários**.

A linha tracejada horizontal em 1,40% evidencia a estabilidade observada nos tratamentos com volumes baixos a moderados de água aquapônica, enquanto apenas o maior volume (400 mL/dia) foi capaz de igualar o desempenho do controle positivo irrigado com água comum.

O fósforo apresentou o padrão de resposta mais claro e consistente entre todos os nutrientes avaliados. Os valores variaram de 0,76% (T1, sem irrigação) a 1,17% (T4, maior volume), com progressão crescente: T0 (0,88%) < T2 (0,84%) < T3 (0,94%) < T4 (1,17%). **O tratamento T4 apresentou teor 33% superior ao controle positivo T0 e 54% superior ao controle negativo T1, demonstrando inequivocamente o efeito benéfico da água aquapônica sobre o enriquecimento de fósforo no substrato. Este resultado é particularmente relevante considerando que o P é frequentemente o nutriente mais limitante em sistemas de produção vegetal.**

A relação C/N apresentou valores decrescentes com o aumento do volume de água aquapônica: T0 (15,50) > T1 (15,26) > T2 (16,11) > T3 (13,03) > T4 (13,99).

As linhas tracejadas horizontais delimitam a faixa ideal (10-15) para utilização agronômica de compostos orgânicos. Observa-se que os tratamentos T3 e T4 apresentaram valores dentro desta faixa, sendo T3 o mais próximo do valor ideal (13,03). Os tratamentos controles (T0 e T1) e o tratamento T2 apresentaram relações C/N ligeiramente acima do limite superior, indicando menor grau de maturação.

A redução da relação C/N nos tratamentos enriquecidos reflete maior atividade microbiana e consequente mineralização do carbono orgânico, características desejáveis em substratos destinados à produção vegetal.

O **pH apresentou incremento gradual proporcional ao volume de água aquapônica** aplicado: T0 e T1 (7,00) < T2 (7,10) < T3 (7,30) < T4 (7,50). A linha tracejada horizontal indica a faixa ideal de pH para a maioria das culturas (6,5-7,5). Todos os valores observados encontram-se dentro ou muito próximos da faixa adequada

Os teores de cálcio variaram de 1,68% (T4) a 2,17% (T0), enquanto o magnésio (barras roxas) apresentou valores entre 0,10% e 0,14%.

Observou-se **tendência de redução no teor de cálcio com o aumento do volume de água aquapônica**, o que pode ser atribuído à formação de complexos organominerais menos solúveis ou à diluição relativa deste nutriente em função do maior teor de matéria orgânica nos tratamentos enriquecidos. **Os teores de magnésio mantiveram-se relativamente estáveis** entre os tratamentos.

O teor de carbono orgânico apresentou valores entre 18,24% (T3) e 27,12% (T0), com o padrão: T0 (27,12%) > T4 (24,48%) > T2 (22,56%) > T1 (21,36%) > T3 (18,24%).

O maior teor de carbono em T0 pode ser atribuído à menor atividade microbiana neste tratamento, resultando em menor mineralização e consequente perda de C como CO₂. Por outro lado, **T3 apresentou o menor teor de carbono**, indicando maior grau de decomposição e maturação, o que é **corroborado pela relação C/N mais adequada observada neste tratamento**.

A CTC apresentou valores elevados em todos os tratamentos, variando de 1040 mmolc/kg (T2) a 1110 mmolc/kg (T0), sem diferenças expressivas entre os tratamentos.

Estes valores elevados de CTC indicam alta capacidade de retenção de nutrientes catiônicos (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺), característica altamente desejável em substratos para produção vegetal. A estabilidade da CTC entre os tratamentos sugere que o processo de compostagem e enriquecimento promoveu formação similar de sítios de troca, independentemente do volume de água aplicado.

Os micronutrientes apresentaram teores adequados em todos os tratamentos:

- **Cobre:** 0,66-0,87 mg/kg
- **Zinco:** 2,29-3,45 mg/kg
- **Manganês:** 10,55-13,27 mg/kg

O zinco e o manganês foram os micronutrientes mais abundantes, com o manganês apresentando as maiores concentrações em todos os tratamentos. Não foram observadas diferenças expressivas nos teores de micronutrientes entre os tratamentos, sugerindo que a água aquapônica não teve efeito significativo sobre estes elementos, cujas concentrações são determinadas principalmente pela composição do material vegetal compostado.

Quanto a possível **mineralização do fósforo**, a análise do balanço de massas de fósforo ao longo do período experimental de 30 dias revelou dinâmica complexa, envolvendo tanto processos de concentração relativa quanto de transformação

bioquímica do nutriente. O material de poda utilizado apresentava concentração inicial de fósforo total de 0,92% (base seca), equivalente a 9,2 g de P por quilograma de material compostável. A água residuária aquapônica, por sua vez, apresentou concentração de fósforo inferior ao limite de quantificação do método analítico empregado ($P < 1 \text{ mg/L}$), conforme Laudo 510/2025.

Tabela 3 – Caracterização físico-química e microbiológica da água residuária aquapônica (Laudo 510/2025, Soloquímica)

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado
Parâmetros Microbiológicos			
Coliformes Termotolerantes (E. coli)	NMP	<1,1	2.420
Salmonella spp.	A/P	—	Presente*
Parâmetros Físico-Químicos			
pH	—	0,1	8,4
Condutividade Elétrica (CE)	$\mu\text{S/cm}$	—	207
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxigênio)	mg/L	3,0	10,0
Nitrogênio Total (N)	mg/L	—	14,48
Nitrogênio Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	0,001	0,60
Fósforo Total (P)	mg/L	1,0	< LQ
Potássio (K)	mg/L	0,004	8,74
Parâmetros de Risco à Saúde			
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	—	1,75
Nitrito (NO ₂ ⁻)	mg/L	0,001	11,96
Arsênio (As)	mg/L	1,14	< LQ
Chumbo (Pb)	mg/L	0,187	< LQ
Cromo (Cr)	mg/L	0,01	< LQ
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,251	< LQ
Níquel (Ni)	mg/L	0,033	< LQ

Fonte: Soloquímica (2025). Laudo nº 510/2025. Amostra coletada em 18/08/2025. LQ = Limite de Quantificação; A/P = Ausência/Presença; NMP = Número Mais Provável.

Não obstante, a análise química do composto final revelou aumento progressivo da concentração de fósforo em função do volume de água aquapônica aplicado. O tratamento T0 (controle com água comum) apresentou 0,88% de P, representando redução de 4% em relação ao material inicial. Em contraste, o tratamento T4 apresentou 1,17% de P, correspondendo a aumento de 27% em relação à concentração inicial. Assim, **os resultados sugerem que o enriquecimento nitrogenado promovido pela água aquapônica pode ter estimulado a atividade microbiana no substrato, favorecendo a mineralização do fósforo orgânico** previamente presente no material de poda e sua consequente concentração relativa no composto final.

Tabela 4. Balanço de massas de fósforo nos tratamentos de compostagem com água residuária aquapônica durante 30 dias.

Tratamento	Descrição	Volume Água (mL/dia)	P final (%)	C final (%)	N final (%)	Perda de C (%)	P via água (mg)	P final total (g)	Contrib. água (%)	Aume nto P (%)	N via água (g)	C/N final
T0	Água comum 200mL	200	0,88	27,1	1,75	-2,16	6	9,18	0,065	-4,348	86,88	15,5
T1	Sem rega	0	0,76	21,4	1,4	3,6	0	7,05	0,000	-17,39	0	15,3
T2	Aqua 100mL	100	0,84	22,6	1,4	2,4	3	8	0,038	-8,696	43,44	16,1
T3	Aqua 200mL	200	0,94	18,2	1,4	6,72	6	8,14	0,074	2,174	86,88	13
T4	Aqua 400mL	400	1,17	24,5	1,75	0,48	12	11,6	0,104	27,17	173,8	14

T0: controle positivo com água comum (200 mL/dia); T1: controle negativo sem rega; T2: água aquapônica (100 mL/dia); T3: água aquapônica (200 mL/dia); T4: água aquapônica (400 mL/dia). Valores de P, C e N expressos em porcentagem (% base seca). “Perda de C” é a subtração do C inicial e C final. O “P via água” representa o fósforo total adicionado em 30 dias de experimento. “Contrib. Água” indica a contribuição percentual da água aquapônica em relação ao P final total. Aumento P representa a variação percentual em relação ao material inicial (0,92%). Composição inicial da poda: P = 0,92%, C = 24,96%, N = 4,20%, C/N = 5,94. Composição da água aquapônica: N total = 14,48 mg/L, P < 1 mg/L (abaixo do limite de quantificação), pH = 8,4. Massa inicial estimada: 1000 g por unidade experimental. *Fonte: Análises laboratoriais Soloquímica, Laudos 449/2025 e 510/2025.*

Dentro de sistemas aquapônicos, **o ciclo biogeoquímico do fósforo** ocorre predominantemente por processos internos de transformação entre formas orgânicas e inorgânicas, tendo como **principal fonte de entrada a ração fornecida aos peixes**. Após a ingestão, apenas uma fração do fósforo é retida no crescimento e metabolismo dos organismos, enquanto **uma parcela significativa é excretada na forma dissolvida** e, sobretudo, associada aos sólidos fecais e à matéria orgânica particulada. Nesse contexto, grande parte do fósforo encontra-se inicialmente em formas orgânicas ou complexadas, apresentando baixa disponibilidade imediata para as plantas. **A mineralização** representa, portanto, um processo-chave para a eficiência do sistema, pois **consiste na degradação microbiana da matéria orgânica por comunidades heterotróficas** presentes nos filtros e unidades específicas de mineralização, promovendo a **liberação de ortofosfato (PO_4^{3-})**, forma mais biodisponível e diretamente assimilável pelas raízes. Uma vez liberado na água, o fósforo circula entre a solução aquosa.

No entanto, durante a compostagem, o fósforo presente nos resíduos vegetais encontra-se, em grande parte, ligado à matéria orgânica e não está imediatamente disponível para as plantas. À medida que os microrganismos decompõem essa matéria orgânica, eles utilizam o carbono como fonte de energia e, nesse processo, liberam o fósforo que estava incorporado nos tecidos vegetais. Esse fósforo passa então para formas mais simples e solúveis, que podem ser absorvidas pelas plantas. Além disso, como parte do carbono é perdido na forma de CO_2 ao longo da decomposição, a concentração relativa de fósforo no composto pode aumentar, mesmo sem adição externa do nutriente (como pela água residuária). Dessa forma, **a mineralização é um processo natural da maturação do composto que torna o fósforo mais disponível** e agronomicamente útil.

Quanto ao **resultado da análise água residuária aquapônica**, a detecção de coliformes termotolerantes e salmonella na indica a necessidade de adoção de medidas de biossegurança durante o manuseio, incluindo uso de equipamentos de proteção individual (EPI). Entretanto, ressalta-se que o processo de compostagem aeróbia, quando conduzido sob condições adequadas de aeração, umidade e tempo de maturação, tende a promover redução significativa da carga microbiana, contribuindo para a segurança sanitária do composto final. Assim, é recomendado monitoramento microbiológico periódico como parte das boas práticas de manejo em sistemas integrados.

A **caracterização física dos substratos enriquecidos** revelou composição granulométrica homogênea entre os tratamentos (Tabela 3). A fração areia foi predominante em todos os tratamentos, variando de 725 a 800 g/Kg (média 760 g/Kg), com coeficiente de variação de apenas 3,9%, indicando elevada uniformidade. Os teores de argila apresentaram variação de 175 a 225 g/Kg (média 200 g/Kg), enquanto a fração silte variou de 25 a 75 g/Kg (média 40 g/Kg). Todos os substratos foram classificados como textura média, sendo quatro tratamentos categorizados como tipo AD 3 e um como AD 2. **Esta homogeneidade textural entre tratamentos assegura que as diferenças observadas nos parâmetros químicos e no desenvolvimento vegetal decorrem exclusivamente dos volumes de água residuária aquapônica**

aplicados durante o período de enriquecimento, e não de variações na estrutura física do substrato, validando a comparabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 5. Caracterização física dos substratos enriquecidos

Parâmetro	T0	T1	T2	T3	T4	Média ± DP
Argila (g/Kg)	200	225	175	200	200	200±19
Argila (%)	20	22,5	17,5	20	20	20,0±1,9
Silte (g/Kg)	25	50	25	75	25	40±23
Silte (%)	2,5	5	2,5	7,5	2,5	4,0±2,3
Areia Total (g/Kg)	775	725	800	725	775	760±30
Areia Total (%)	77,5	72,5	80	72,5	77,5	76,0±3,0
Tipo de Solo	AD 3	AD 3	AD 2	AD 3	AD 3	-
Classificação Textural	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	-

Nota: T0 (água comum 200 mL/dia), T1 (sem irrigação), T2 (água aquapônica 100 mL/dia), T3 (água aquapônica 200 mL/dia - recomendado), T4 (água aquapônica 400 mL/dia). Classificação segundo metodologia IAC. Análise: Laboratório Soloquímica (Laudo 922/2025).

1.2 FASE 2– CULTIVO TESTE

Quanto a análise das plantas e seus parâmetros morfológicos foram analisados os parâmetros de massa aérea e radicular, conforme apresentado a tabela abaixo:

Tabela 6 - Parâmetros morfológicos de manjerição (*Ocimum basilicum* L.) cultivado em substratos enriquecidos com diferentes doses de água residuária aquapônica durante a Fase 1.

Parâmetro	T0 (Controle +)	T1 (Controle -)	T2 (100 mL/dia)	T3 (200 mL/dia)	T4 (400 mL/dia)
Altura (cm)	46.08 ± 7.99	51.58 ± 5.70	50.36 ± 4.50	49.52 ± 3.13	46.22 ± 10.99
Diâmetro Caule (mm)	3.75 ± 0.50	3.50 ± 0.58	4.20 ± 0.45	4.25 ± 0.50	3.60 ± 0.89
Nº Folhas	78.00 ± 39.86	91.25 ± 22.90	110.00 ± 19.94	119.75 ± 19.03	84.60 ± 40.34
Parte Aérea (g)	7.82 ± 4.34	10.32 ± 3.02	11.86 ± 2.44	12.52 ± 1.78	9.04 ± 4.43
Raiz (g)	11.75 ± 7.95	16.42 ± 4.93	18.42 ± 9.24	17.15 ± 3.65	11.56 ± 6.68
Compr. Raiz Principal (cm)	23.42 ± 3.00	22.55 ± 3.51	22.28 ± 2.57	21.42 ± 2.79	22.82 ± 5.84
Peso total	19.40 ± 12.15	26.72 ± 7.92	30.10 ± 10.98	29.45 ± 5.26	20.38 ± 10.67

Valores expressos como média $\pm$ desvio padrão. T0: substrato irrigado com água comum (200 mL/dia); T1: substrato sem irrigação; T2-T4: substratos irrigados com 100, 200 e 400 mL/dia de água residuária aquapônica, respectivamente. $n = 4-5$ repetições por tratamento.

A avaliação morfológica das plantas de manjeriço revelou padrões distintos de resposta aos diferentes níveis de enriquecimento dos substratos (Tabela 1). Em relação à altura, observou-se que o tratamento T4 ($46,22 \pm 10,99$ cm) apresentou redução significativa em comparação aos tratamentos intermediários, equiparando-se ao controle positivo T0 ($46,08 \pm 7,99$ cm), enquanto T1, T2 e T3 mantiveram alturas superiores, variando entre 49,52 e 51,58 cm. O diâmetro do caule mostrou-se responsivo ao enriquecimento, com T3 alcançando o maior valor ($4,25 \pm 0,50$ mm), representando incremento de 13,3% em relação a T0 ($3,75 \pm 0,50$ mm) e 21,4% superior ao controle negativo T1 ($3,50 \pm 0,58$ mm). **O número de folhas evidenciou clara resposta dose-dependente** nos tratamentos T2 e T3, que registraram $110,00 \pm 19,94$ e $119,75 \pm 19,03$ folhas, respectivamente, correspondendo a incrementos de 41,0% e 53,5% em relação ao controle positivo (T0). Entretanto, observou-se declínio acentuado em T4 ($84,60 \pm 40,34$ folhas), representando redução de 29,4% em relação a T3 e apenas 8,5% de incremento sobre T0, sugerindo possível efeito inibitório da dose elevada de enriquecimento.

A biomassa da parte aérea corroborou este padrão, com T3 apresentando desempenho superior ($12,52 \pm 1,78$ g), equivalente a incremento de 60,1% sobre o controle positivo, enquanto T2 registrou $11,86 \pm 2,44$ g (51,7% superior a T0). **A massa radicular dos tratamentos enriquecidos demonstrou superioridade expressiva em relação aos controles**, com T2 e T3 alcançando $18,42 \pm 9,24$ g e $17,15 \pm 3,65$ g, respectivamente, representando incrementos de 56,7% e 45,9% sobre T0 ($11,75 \pm 7,95$ g) e de 12,2% e 4,4% sobre T1 ($16,42 \pm 4,93$ g). **O comprimento da raiz principal não apresentou variação significativa entre tratamentos**, mantendo-se estável na faixa de 21,42 a 23,42 cm, não constituindo parâmetro discriminante para avaliação do efeito do enriquecimento.

O peso total das plantas reforçou a efetividade do enriquecimento moderado, com T2 e T3 atingindo $30,10 \pm 10,98$ g e $29,45 \pm 5,26$ g, respectivamente, correspondendo a incrementos de 55,2% e 51,8% em relação a T0 ($19,40 \pm 12,15$ g). Notavelmente, T4 apresentou peso total de apenas $20,38 \pm 10,67$ g, praticamente

equivalente ao controle positivo (incremento de apenas 5,1%), evidenciando perda de eficiência produtiva.

A análise conjunta dos parâmetros morfológicos indica existência de “dose ótima” de enriquecimento situada entre 100 e 200 mL/dia de água residuária aquapônica (T2 e T3), enquanto a dose de 400 mL/dia (T4) pode representar carga nutricional excessiva, possivelmente relacionada a efeitos de salinidade ou desbalanço nutricional, constituindo tema relevante para investigações futuras sobre limites de aplicação de água aquapônica em sistemas de compostagem enriquecida.



Figura 22. Sistema radicular de *Ocimum basilicum* cultivado em substratos com diferentes históricos de enriquecimento (T0–T4).

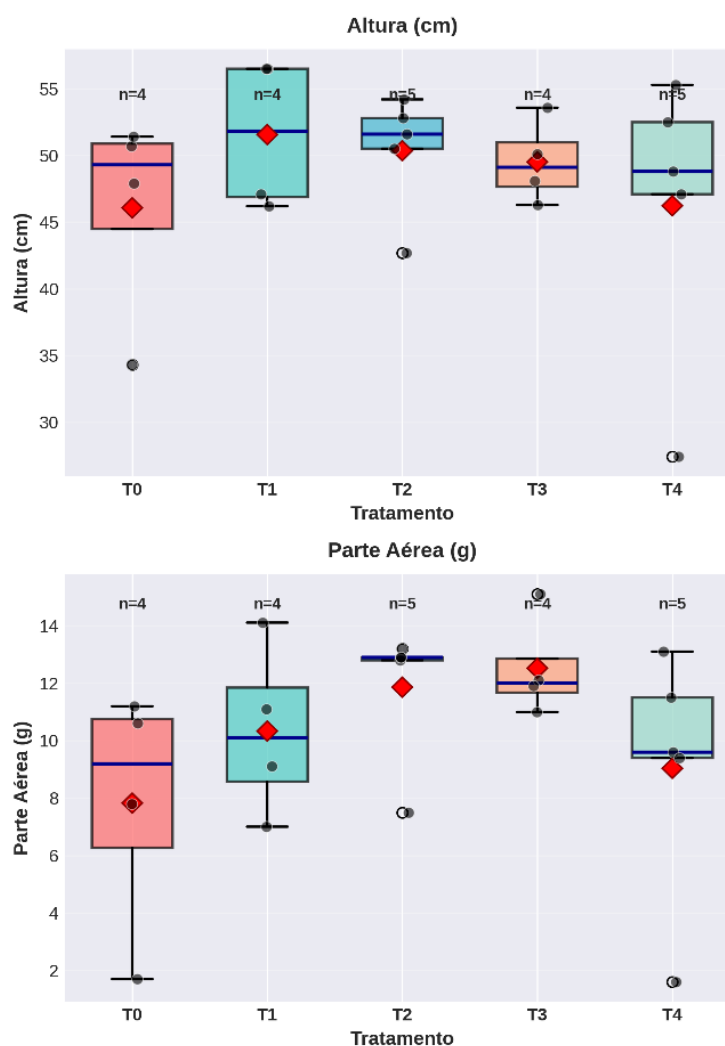


Figura 23. Análise morfológica de manjerição (*Ocimum basilicum* L.). Boxplots representando a distribuição das variáveis. As caixas coloridas representam o intervalo interquartil (Q1-Q3, 50% dos dados centrais), a linha azul interna representa a mediana, o losango vermelho representa a média, e os pontos pretos representam as observações individuais. As linhas verticais (whiskers) se estendem até 1,5 vezes o intervalo interquartil. n = número de plantas vivas por tratamento, apresentado acima de cada boxplot. Não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos para as variáveis avaliadas (ANOVA, $p > 0,05$), indicando que os diferentes volumes de enriquecimento proporcionaram efeito residual similar no crescimento das plantas.

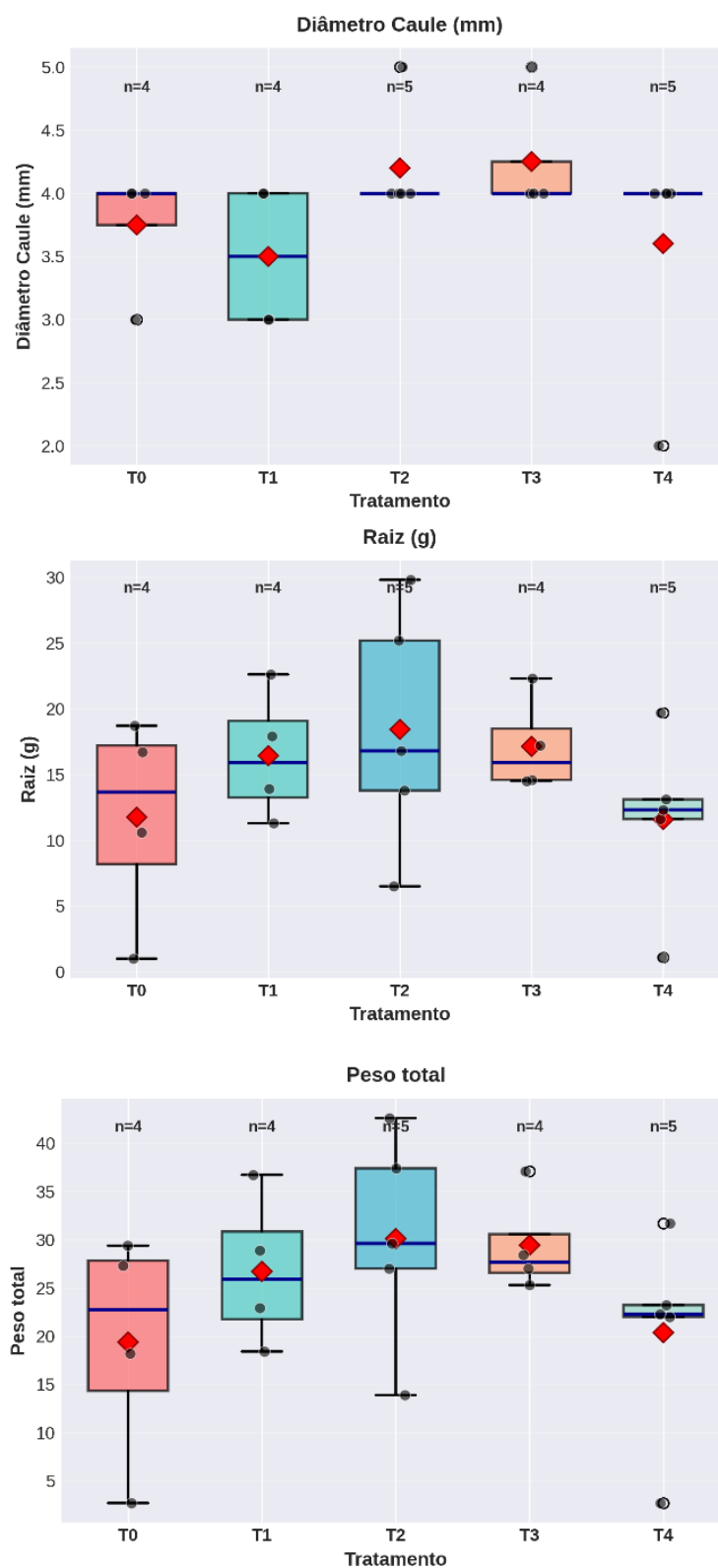


Figura 24. Análise morfológica de manjericao (*Ocimum basilicum* L.). Boxplots representando a distribuição das variáveis diâmetro, peso e raiz.

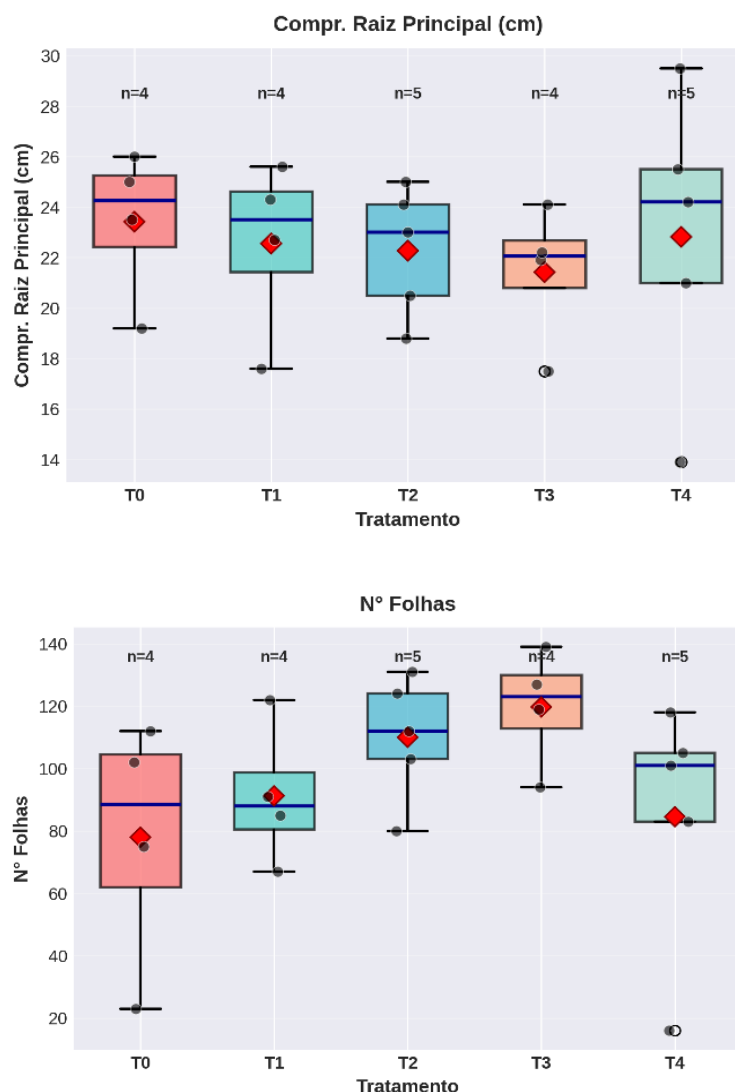


Figura 25. Análise morfológica de manjerição (*Ocimum basilicum* L.). Boxplots representando a distribuição das variáveis peso, raiz e número de folhas

Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para as variáveis morfológicas avaliadas. A análise de variância (ANOVA) revelou que as alturas das plantas ($F_{4,17} = 0.52$, $p = 0.72$), número de folhas ($F_{4,17} = 1.44$, $p = 0.26$), massa fresca da parte aérea ($F_{4,17} = 1.40$, $p = 0.28$) e peso total ($F_{4,17} = 1.16$, $p = 0.36$) não diferiram significativamente entre os tratamentos ($\alpha = 0.05$).

A ausência de significância estatística está associada principalmente ao número reduzido de repetições ($n = 4-5$ por tratamento) e à elevada variabilidade biológica inerente ao crescimento vegetal em substratos orgânicos. Apesar disso, observou-se padrão consistente de incremento nos tratamentos intermediários (T2 e T3), com diferenças percentuais agronomicamente relevantes. Portanto, os resultados indicam tendência biológica coerente, ainda que o poder estatístico não tenha sido

suficiente para detectar diferenças ao nível de 5% de probabilidade. Em estudos aplicados em agricultura urbana, a relevância prática dos incrementos percentuais também deve ser considerada juntamente com a análise estatística formal.

Cabe destacar que o número de repetições foi definido dentro das limitações operacionais e orçamentárias do estudo, uma vez que as análises laboratoriais físico-químicas e microbiológicas envolvem custos elevados e o experimento foi conduzido sem financiamento externo específico. Ainda assim, o delineamento adotado permitiu gerar dados tecnicamente consistentes e replicáveis, oferecendo base sólida para investigações futuras com maior escala amostral e poder estatístico ampliado.

A figura abaixo apresenta a comparação das médias e desvio padrão dos parâmetros de altura, número de folhas, parte aérea e peso total:

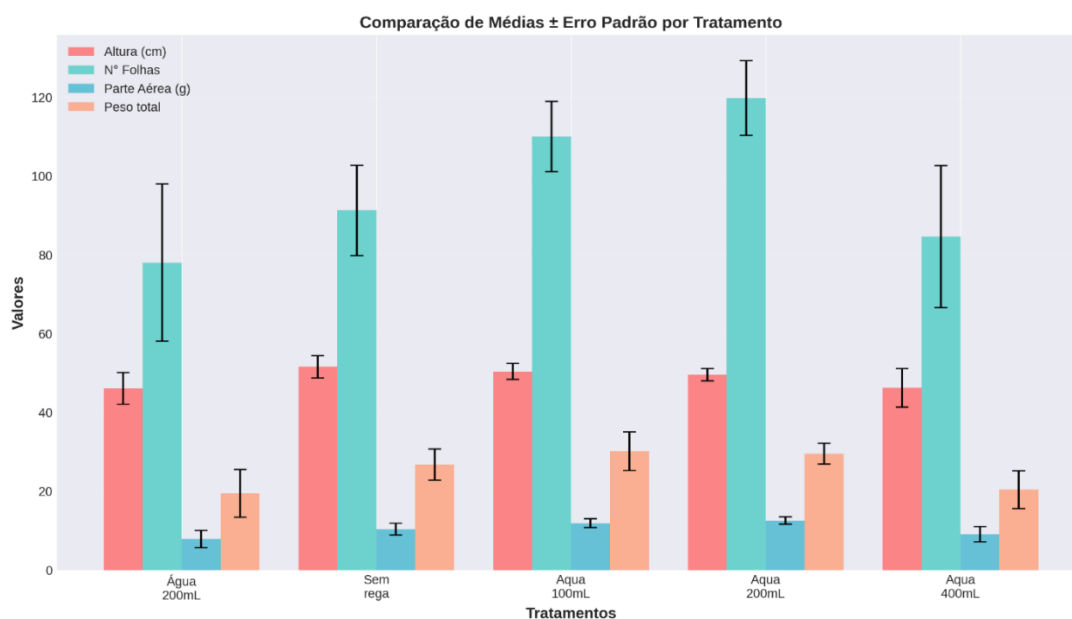


Figura 26. Médias ($\pm$ erro padrão) das características morfológicas de manjerição cultivado em substratos com diferentes históricos de enriquecimento. Barras representam altura (vermelho), número de folhas (verde), massa fresca da parte aérea (azul) e massa fresca total (laranja). T0: controle com água comum (200 mL/dia); T1: sem rega; T2-T4: enriquecimento com água aquapônica (100, 200 e 400 mL/dia, respectivamente) durante a Fase 1. Barras de erro = erro padrão.

A tabela abaixo apresenta os resultados laboratoriais quanto à Peso Total (g), Massa Aérea Úmida (g), Massa Radicular Úmida (g), Massa Aérea Sêca (g), Massa Radicular Sêca (g), Relação Parte Aérea/Radicular e Umidade (g) por tratamento do experimento:

Tabela 7. Parâmetros morfológicos de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) após 30 dias de cultivo em substratos enriquecidos - análise laboratorial.

Parâmetro	T0 (Controle +)	T1 (Controle -)	T2 (100 mL/dia)	T3 (200 mL/dia)	T4 (400 mL/dia)
Peso Total (g)	25.48 ± 5.47	24.42 ± 8.08	31,93 ± 7,07	25.64 ± 5,43	21.21 ± 4.23
Massa Aérea Úmida (g)	11.72 ± 7.22	11.32 ± 5.32	15,06 ± 3,31	15.05 ± 2,36	14.41 ± 2.53
Massa Radicular Úmida (g)	13.79 ± 5.83	13.03 ± 3.32	16,18 ± 9,92	11.64 ± 3,71	7.28 ± 1.89
Massa Aérea Sêca (g)	22.43 ± 4.67	21.23 ± 7.34	28.03 ± 5.56	22.80 ± 4,53	18.84 ± 3.97
Massa Radicular Sêca (g)	1.65 ± 0.76	1.49 ± 0.43	2,09 ± 1.61	1.37 ± 0,57	0.79 ± 0.12
Relação Parte Aérea/Radicular	13.58 ± 9.07	14.29 ± 3.91	16,23 ± 9.56	16.10 ± 4,35	24.90 ± 1.46
Umidade (g)	88.02 ± 0.78	87.71 ± 1.27	87.20 ± 2.06	88.19±1,02	89.48 ± 0.94

Valores expressos como média ± desvio padrão. T0: substrato irrigado com água comum durante Fase 1 (n=3); T1: substrato sem irrigação durante Fase 1 (n=4); T2-T4: substratos enriquecidos com 100, 200 e 400 mL/dia de água residuária aquapônica durante Fase 1, respectivamente (n=5, 4 e 4). Todos os tratamentos receberam irrigação padronizada de 200 mL/dia de água aquapônica durante a Fase 2 de cultivo (30 dias). Dados obtidos em análise laboratorial Soloquímica (Boletim 1311/19DEZ2025).

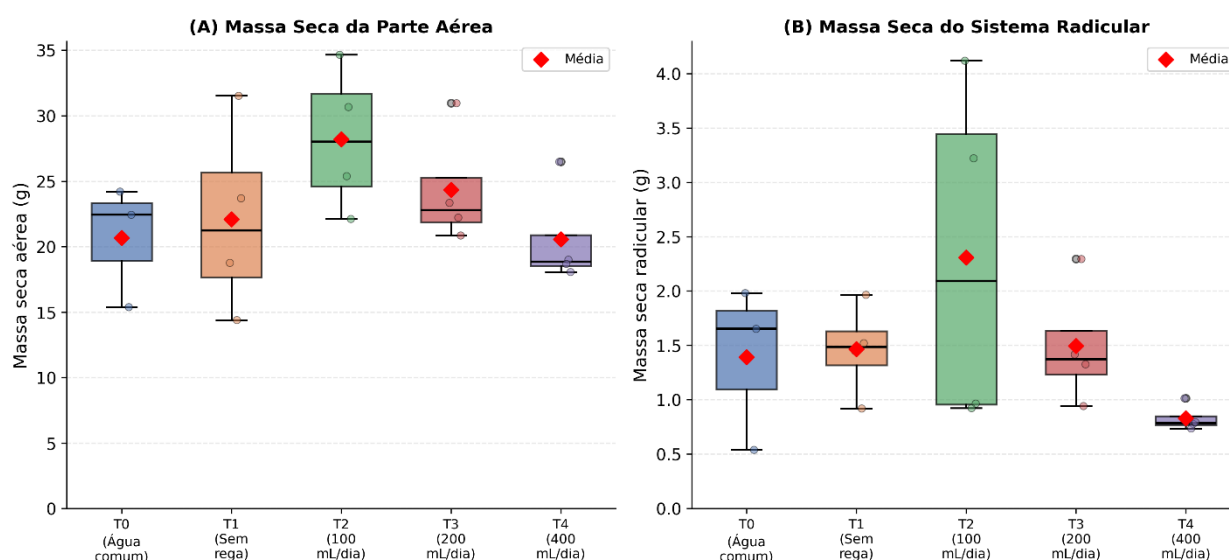


Figura 28. Massa seca da parte aérea (A) e do sistema radicular (B) de manjeriço (*Ocimum basilicum*) cultivado em substratos enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica. Boxplots representam mediana, quartis e valores extremos. Losangos vermelhos indicam

médias. T0: água comum 200 mL/dia; T1: sem irrigação; T2: 100 mL/dia; T3: 200 mL/dia; T4: 400 mL/dia. n = 3-5 por tratamento. ANOVA: $p > 0,05$.

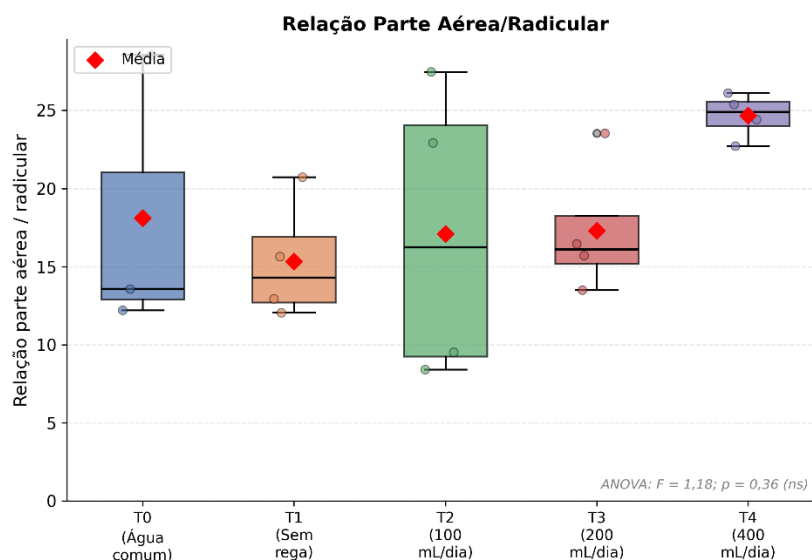


Figura 29. Relação parte aérea/radicular de manjeriço (*Ocimum basilicum*) cultivado em substratos enriquecidos com diferentes volumes de água residuária aquapônica. Boxplots representam mediana, quartis e valores extremos. Losangos vermelhos indicam médias. Pontos individuais representam repetições. T0: água comum 200 mL/dia; T1: sem irrigação; T2: 100 mL/dia; T3: 200 mL/dia; T4: 400 mL/dia. n = 3-5 por tratamento. ANOVA: $F = 1,18$, $p = 0,36$.

A tabela abaixo apresenta uma análise comparativa dos 5 tratamentos com indicação de qual foi o melhor tratamento do ponto de vista da **agricultura urbana**.

Tabela 8 – Análise comparativa dos cinco tratamentos para agricultura urbana integrada

Critério	T0	T1	T2	T3	T4
Relação C/N	15,5	15,26	16,11	13,03	13,99
P ₂ O ₅ (%)	0,88	0,76	0,84	0,94	1,17
N Total (%)	1,75	1,4	1,4	1,4	1,75
pH	7,0	7,0	7,1	7,3	7,5
CTC (mmolc/kg)	1110	1080	1040	1095	1045
Nº Folhas	78	91	110	119	84
Parte aérea (g)	7,82	10,32	11,86	12,52	9,04
Peso total (g)	19,40	26,72	30,10	29,45	20,38
Eficiência do uso do efluente	Baixa	—	Média	Alta	Baixa
Risco de excesso nutricional	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado

Viabilidade comercial	Boa	Limitada	Boa	Muito boa	Boa
Adequação agricultura urbana	Média	Média	Alta	Muito Alta	Média

A tabela abaixo estima possíveis ganhos no cenário em que o agricultor urbano optar pelo composto de poda enriquecido.

Tabela 9– Ganho percentual de produtividade com enriquecimento (T3 vs T1)

Parâmetro	T1 (Sem rega)	T3 (200 mL/dia)	Ganho (%)
Altura (cm)	51,58	49,52	-4,0%
Diâmetro do caule (mm)	3,50	4,25	+21,4%
Nº de folhas	91,25	119,75	+31,2%
Parte aérea fresca (g)	10,32	12,52	+21,3%
Massa radicular fresca (g)	16,42	17,15	+4,4%
Peso total (g)	26,72	29,45	+10,2%

2 DISCUSSÃO

A fase 1 dessa pesquisa consegue responder o quanto o composto de poda se torna nutricionalmente equilibrado após o enriquecimento com água residuária e seu **potencial de comercialização**. O produto da sua Fase 1 é resultado de compostagem de podas urbanas (origem vegetal) enriquecido com água residuária aquapônica (origem animal — dejetos de tilápia). São duas matérias-primas orgânicas distintas, o que o enquadraria como orgânico misto ou composto, **Classe A** (Art. 3, I), MAPA IN SDA nº 61/2020 e nº 7/2016, já que as matérias-primas são de atividades agropecuárias/extrativas, sem contaminantes sanitários. Assim, como pode ser classificado como condicionador de solo de acordo com a MAPA IN SDA nº 35/2006.

Os compostos enriquecidos com água residuária aquapônica atendem a todos os requisitos obrigatórios para registro junto ao MAPA tanto como **Fertilizante Orgânico Composto Classe A** (IN SDA/MAPA nº 61/2020, Art. 8, II) quanto como **Condicionador de Solo Classe A** (IN MAPA nº 35/2006, Art. 7), demonstrando viabilidade regulatória para comercialização em ambas as categorias. Os parâmetros mandatórios para fertilizante orgânico — N Total $\geq$ 0,5%, CO $\geq$ 15% e C/N $\leq$ 20 —

foram atendidos por todos os tratamentos, enquanto a CTC superou em mais de cinco vezes o mínimo exigido para condicionador de solo (≥ 200 mmolc/kg). Os contaminantes analisados em T4 também se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pela IN SDA nº 27/2006, Anexo V.

Cabe ressaltar que a deficiência de potássio observada nos tratamentos — com T0 e T4 apresentando K_2O abaixo do limite de quantificação — não constitui impedimento para o registro ou a classificação do produto, uma vez que a IN 61/2020 estabelece garantia "conforme declarado" para este nutriente, sem mínimo obrigatório para compostos orgânicos. Contudo, do ponto de vista comercial, essa limitação pode comprometer a competitividade do produto frente a fertilizantes orgânicos que oferecem perfil NPK mais equilibrado, impactando a aceitação pelo mercado consumidor. Alternativamente, a formulação de blends com fontes complementares de potássio — como cinza de biomassa ou sulfato de potássio natural — poderia viabilizar a comercialização como fertilizante orgânico com perfil nutricional mais completo, sem comprometer a classificação Classe A do produto.

Nesse contexto, o posicionamento como condicionador de solo para agricultura urbana representa uma estratégia comercial mais vantajosa, pois a expectativa do consumidor quanto ao aporte de potássio é menor nessa categoria de produto, cujo valor reside principalmente na melhoria das propriedades físicas e biológicas do solo — funções para as quais o composto enriquecido apresenta desempenho destacado, conforme evidenciado pela elevada matéria orgânica (338–402 g/kg) e CTC (1.040–1.110 mmolc/kg).

A integração dos resultados físico-químicos e morfológicos indica que o tratamento T3 (200 mL/dia) representa um possível “ponto ótimo agrônomo” do sistema, conciliando adequada maturação do composto (C/N 13,03), enriquecimento nutricional equilibrado, resposta vegetal consistente e maior eficiência no uso do efluente aquapônico. O tratamento T4, embora tenha apresentado maior teor de fósforo, não resultou em incremento produtivo proporcional, sugerindo efeito de saturação nutricional. Assim, sob a perspectiva de agricultura urbana integrada, **T3 apresenta o melhor compromisso entre qualidade agrônômica, viabilidade operacional e sustentabilidade do sistema.**

Os resultados demonstram que a água aquapônica promoveu efeitos dose-dependentes sobre as características químicas do substrato, com destaque para o

enriquecimento de fósforo e otimização da relação C/N, indicando maior grau de maturação nos tratamentos enriquecidos.

A comparação entre o substrato sem enriquecimento (T1) e o substrato enriquecido com 200 mL/dia de água residuária aquapônica (T3) evidencia ganhos agrônômicos relevantes para agricultura urbana. O enriquecimento prévio pode resultar em um **incremento de 31,2% no número de folhas e 21,3% na biomassa fresca da parte aérea**, parâmetros diretamente associados à produtividade comercial do manjerição. Observou-se ainda aumento de **21,4% no diâmetro do caule e 10,2% no peso total** das plantas, indicando maior vigor estrutural e eficiência produtiva. Esses resultados demonstram que o enriquecimento do composto antes do cultivo proporciona tendência consistente de maior desempenho em relação ao uso do composto de poda sem tratamento, configurando estratégia tecnicamente mais eficiente para sistemas urbanos integrados de aquaponia-compostagem.

Na prática, considerando que o **vaso nº 15** usado no enriquecimento continha aproximadamente **1 L de composto** e que o melhor desempenho foi observado em **T3 (200 mL/dia por 30 dias)**, a “dose” prática de enriquecimento para o agricultor urbano pode ser expressa como **6 L de água residuária aquapônica por litro de composto ao longo de 30 dias** ($200 \text{ mL} \times 30 = 6.000 \text{ mL} = 6 \text{ L}$). Em termos de recomendação operacional, isso equivale a: **para cada balde de 10 L de composto**, aplicar **2 L/dia** de água aquapônica (totalizando **60 L** em 30 dias); para um lote de **50 L**, aplicar **10 L/dia** (total **300 L/30 dias**). A lógica agrônômica por trás dessa recomendação é que o enriquecimento prévio promove **maturação e estabilização** (redução da C/N para ~ 13), melhorando a disponibilidade de nutrientes “úteis” e reduzindo o risco de imobilização de N no canteiro, o que se traduz em maior vigor e produtividade no cultivo subsequente. Na prática, o agricultor pode executar esse enriquecimento em “lotes” semanais, mantendo o composto úmido (sem encharcar), com **revolvimento semanal** para garantir aeração e distribuição homogênea do efluente, replicando o manejo do experimento e transformando o efluente em insumo de fertilização orgânica com dose clara e escalonável para agricultura urbana.

Considerando a **dose ótima identificada no tratamento T3** (200 mL/dia por litro de composto durante 30 dias), a recomendação para agricultura urbana em canteiros com incorporação de **5 cm de composto** (aproximadamente 50 L por m^2) corresponde à aplicação total de 300 L de água residuária aquapônica por metro quadrado ao longo de 30 dias, equivalente a **10 L/ m^2 /dia**. Essa aplicação deve ser

fracionada diariamente, com revolvimento semanal do material para garantir adequada oxigenação e distribuição homogênea do efluente, evitando condições anaeróbias. Tal manejo permite replicar a condição experimental que resultou em melhor equilíbrio nutricional ($C/N \approx 13$) e maior desempenho vegetal, configurando recomendação tecnicamente fundamentada para sistemas urbanos integrados de aquaponia-compostagem.

É fundamental distinguir, para fins de interpretação científica, entre significância estatística e relevância agrônômica prática. A análise de variância (ANOVA) dos parâmetros morfológicos não detectou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), resultado que reflete, em parte, o tamanho amostral reduzido ($n = 5$ por tratamento) e a variabilidade inerente ao material propagado por estaquia, condições que limitam o poder estatístico do teste. No entanto, a ausência de significância estatística não implica ausência de efeito agrônômico real. Diferenças percentuais consistentes de 21% a 31% nos principais parâmetros produtivos, observadas com tendência monotônica crescente de T1 a T3, têm expressão prática relevante em sistemas de agricultura urbana de pequena escala, nos quais incrementos dessa magnitude podem ser determinantes para a viabilidade econômica de um ciclo produtivo. A interpretação integrada dos dados químicos do substrato — onde os efeitos foram pronunciados e consistentes — com os dados morfológicos oferece uma visão mais robusta dos resultados do que a análise isolada de cada conjunto de variáveis.

Cabe registrar que a comparação direta dos resultados obtidos com a literatura científica disponível é limitada pelo ineditismo relativo desta abordagem. A integração específica entre água residuária de sistemas aquapônicos e compostagem de podas arbóreas urbanas constitui uma interface ainda pouco explorada em pesquisas publicadas: a revisão sistemática conduzida no Capítulo 1 desta dissertação identificou que apenas 6,3% dos estudos analisados abordavam a combinação aquaponia-compostagem com material de poda urbana. A escassez de estudos com delineamento experimental análogo torna inviável a comparação paramétrica direta de todos os resultados. Esse caráter pioneiro, embora limite as possibilidades de comparação direta, reforça a contribuição original desta pesquisa e sinaliza uma lacuna científica relevante a ser preenchida por estudos futuros com amostras maiores e maior diversidade de espécies vegetais bioindicadoras.

A expressão dos resultados em variações percentuais complementa a análise dos valores absolutos e revela a magnitude real dos efeitos do enriquecimento aquapônico. Enquanto as diferenças em valores absolutos entre tratamentos podem parecer modestas dado o pequeno porte das plantas no período de cultivo de 45 dias, a perspectiva percentual evidencia ganhos expressivos: T3 versus T1 resultou em +31,2% no número de folhas, +21,3% na biomassa fresca da parte aérea, +21,4% no diâmetro do caule e +10,2% no peso total das plantas. Esses incrementos, observados de forma consistente e com tendência dose-resposta clara até T3, possuem expressão agrônômica direta em sistemas de produção de ervas aromáticas, nos quais a produtividade por unidade de área é o principal indicador de eficiência produtiva.

Dentre os parâmetros morfológicos avaliados, o número de folhas merece destaque especial pela sua relevância comercial direta. No mercado de ervas aromáticas frescas, o manjerição é comercializado por quantidade de ramos e folhas, não por massa bruta, o que torna esse parâmetro o mais diretamente associado ao retorno econômico do produtor. O incremento de 31,2% no número de folhas observado em T3 em relação ao controle negativo (T1) traduz-se, na prática, em maior quantidade de produto comercializável por vaso cultivado, o que pode ser determinante para a viabilidade econômica de sistemas de agricultura urbana integrada. Esse ganho, combinado com o aumento de 21,4% no diâmetro do caule — indicador de vigor estrutural —, aponta para um perfil produtivo superior nos substratos enriquecidos, conferindo ao protocolo de enriquecimento aquapônico um diferencial competitivo mensurável para o agricultor urbano que trabalha com cultivos de folhosas e ervas aromáticas.

A análise granulométrica dos substratos enriquecidos demonstrou que a aplicação de diferentes volumes de água aquapônica não alterou significativamente a distribuição de tamanho de partículas entre os tratamentos, mantendo predominância de frações compatíveis com a origem do composto de poda arbórea. No entanto, o maior teor de umidade residual nos tratamentos T3 (40,27%) e T4 (45,77%) em comparação a T1 (35,29%) pode ter influenciado a estrutura porosa do substrato, afetando a resistência mecânica à penetração radicular. Substratos com umidade equilibrada, como em T3, tendem a oferecer menor resistência ao crescimento radicular em comprimento, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular. Em contrapartida, substratos com umidade excessiva, como possivelmente em T4, podem

comprometer a aeração da zona radicular e limitar o desenvolvimento das raízes, contribuindo para o efeito de superdosagem observado nos parâmetros morfológicos desse tratamento. Essa relação entre estrutura física do substrato e resposta radicular reforça a importância de monitorar não apenas os parâmetros químicos, mas também as propriedades físicas do composto ao longo do processo de enriquecimento.

Do ponto de vista econômico, o protocolo de enriquecimento desenvolvido apresenta potencial de redução de custos relevante para o agricultor urbano. Substratos comerciais para cultivo de ervas aromáticas, como os disponíveis no varejo do DF, custam entre R\$ 25,00 e R\$ 35,00 por saco de 15 litros (valores de referência 2025), enquanto o composto de poda enriquecido com efluente aquapônico pode ser produzido a custo marginal próximo a zero — o efluente é subproduto da manutenção rotineira do sistema aquapônico, e o composto de poda está disponível em volumes significativos a partir de resíduos urbanos de baixo custo de aquisição. Considerando que o desempenho agrônômico do substrato T3 foi comparável ou superior ao esperado de substratos comerciais de mesma categoria para ervas aromáticas, a relação custo-benefício favorece a adoção do protocolo, com potencial de gerar economia estimada de 70% a 90% nos custos de aquisição de substrato para o agricultor urbano que já opera um sistema aquapônico. Essa dimensão econômica reforça a viabilidade prática da integração aquaponia-compostagem como estratégia de economia circular em contexto urbano, agregando valor a dois resíduos que de outra forma seriam descartados.

3 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a aplicação de água residuária aquapônica como agente de enriquecimento do composto de poda urbana é viável técnica, agrônômica e regulatoriamente. A questão central da pesquisa — em que medida o efluente aquapônico pode suprir as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas — foi respondida de forma parcialmente afirmativa: embora o nitrogênio não tenha apresentado acúmulo linear dose-dependente, os processos biológicos ativados pelo efluente promoveram transformações nutricionais significativas no substrato, especialmente no fósforo, com incremento de 54% no tratamento T4 (400 mL/dia). O tratamento T3 (200 mL/dia) foi identificado como a dose operacional ótima, equilibrando enriquecimento nutricional, relação C/N adequada e resposta vegetal superior, com ganhos de 31,2% no número de folhas e 21,3% na biomassa fresca da parte aérea do manjeriço em relação ao controle negativo. Todos os tratamentos atenderam integralmente aos requisitos da IN SDA/MAPA nº 61/2020 para registro como Fertilizante Orgânico Composto Classe A e da IN MAPA nº 35/2006 para Condicionador de Solo Classe A, conferindo ao produto gerado viabilidade comercial e regulatória. Conclui-se que a integração aquaponia-compostagem representa uma estratégia tecnicamente fundamentada para o fechamento de ciclos de nutrientes em ambientes urbanos, transformando dois resíduos orgânicos em um insumo fertilizante registrável e agronomicamente eficiente.

Em relação às hipóteses que orientaram esta investigação, conclui-se: (i) a hipótese de que a água residuária aquapônica pode suprir eficientemente as demandas de nitrogênio na compostagem de podas é parcialmente confirmada — o nitrogênio não acumulou linearmente com a dose aplicada, mas os processos biológicos ativados pelo efluente promoveram transformações nutricionais significativas, particularmente no fósforo, evidenciando que o aporte de nitrogênio estimula a mineralização de nutrientes já presentes no substrato; (ii) a hipótese de que os compostos resultantes apresentam segurança química e microbiana para uso agrícola é plenamente confirmada — todos os tratamentos atenderam integralmente à IN SDA/MAPA nº 61/2020 e à IN MAPA nº 35/2006, com contaminantes abaixo dos limites estabelecidos pela IN SDA nº 27/2006; e (iii) a hipótese de que a integração resultaria em composto com relação C/N equilibrada é confirmada — o tratamento T3 atingiu C/N de 13,03, dentro da faixa ideal de 10 a 15 para uso agrônomo, demonstrando que a dose de 200 mL/dia é suficiente para promover a maturação adequada do substrato.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a água residuária de sistemas aquapônicos pode **suprir parcialmente as demandas de nitrogênio na compostagem de podas arbóreas urbanas**, promovendo o enriquecimento nutricional do composto e resultando em um substrato agrônomo de boa qualidade.

O resultado evidencia que a incorporação de efluente aquapônico transforma o composto de poda não apenas por adição direta de nutrientes, mas por **ativação de processos biológicos internos ao próprio substrato**.

O cultivo de manjeriço como bioindicador na Fase 2 confirmou que o enriquecimento prévio dos substratos se traduz em ganhos produtivos visíveis. O enriquecimento prévio (comparando T1 vs T3) pode resultar em um **incremento de 31,2% no número de folhas e 21,3% na biomassa fresca da parte aérea**, parâmetros diretamente associados à produtividade comercial do manjeriço. Observou-se ainda aumento de **21,4% no diâmetro do caule e 10,2% no peso total** das plantas.

Em termos práticos, **os resultados indicam que a substituição do substrato convencional pelo composto de poda enriquecido pode representar ganho agrônomo mensurável**, expresso em maior produção de folhas, incremento de biomassa por vaso e maior vigor vegetativo. Tal desempenho foi observado com uma **estratégia operacional simples e de baixo custo**: aplicação diária de 200 mL de efluente aquapônico por vaso durante 30 dias, previamente ao plantio. Essa etapa de enriquecimento transforma o efluente em insumo fertilizante e agrega valor ao composto antes do início do ciclo produtivo, potencializando sua eficiência agrônoma em **sistemas de agricultura urbana integrada**.

Um aspecto que merece destaque especial é a dimensão regulatória do produto gerado. **Os compostos enriquecidos atenderam integralmente aos requisitos obrigatórios do MAPA para registro como Fertilizante Orgânico Composto Classe A (IN SDA/MAPA nº 61/2020) e como Condicionador de Solo Classe A (IN MAPA nº 35/2006).**

Do ponto de vista ambiental, **a integração aquaponia-compostagem promove o aproveitamento sinérgico de dois resíduos urbanos que, tratados separadamente, demandariam custos e infraestrutura distintos**. Nas grandes cidades, onde o volume de podas públicas e privadas é expressivo e os sistemas aquapônicos crescem em instituições de ensino, condomínios e empresas de pequeno porte, a escalabilidade desta abordagem é imediata e tecnicamente respaldada.

A dose operacional identificada — **“dose ótima” identificada no tratamento T3** - 200 mL de água residuária aquapônica - traz uma informação relevante, com potencial de ser escalável e diretamente aplicável, afinal um agricultor urbano, uma escola que opera sistema aquapônico, uma associação de moradores que compostam as podas do condomínio: todos encontram neste estudo uma orientação técnica precisa sobre **como transformar dois resíduos em um insumo produtivo**, como também **usar a água residuária para enriquecer diretamente em canteiros** (10 L/m²/dia para adubar 5 cm de profundidade). A pesquisa apresenta que a integração é viável — ela quantifica, mostrar como fazê-la, com qual volume, por quanto tempo, com qual resultado esperado e dentro de quais marcos regulatórios.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se: (i) investigar o fracionamento das formas de fósforo no substrato ao longo do processo de enriquecimento, a fim de elucidar os mecanismos de mineralização do fósforo orgânico identificados neste

estudo; (ii) ampliar o delineamento experimental com maior número; (iii) testar outras espécies vegetais de interesse comercial como bioindicadores, especialmente hortaliças folhosas para a agricultura urbana; (iv) investigar a suplementação do protocolo com fontes naturais de potássio, dado que este nutriente permaneceu abaixo do limite de quantificação na maioria dos tratamentos; e (v) validar a escalabilidade do protocolo em escala piloto, incluindo análise da comunidade microbiana e monitoramento dos fluxos de nitrogênio ao longo do tempo;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BABCOCK-JACKSON, Lisa et al. **Sustainable Fertilizers: Publication Landscape on Wastes as Nutrient Sources, Wastewater Treatment Processes for Nutrient Recovery, Biorefineries, and Green Ammonia Synthesis**. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 71, n. 22, p. 8265–8296, 2023. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c00454. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10251522/>. Acesso em: 02 fev. 2026

CARBALLEIRA, C. et al. **Towards Environmental Sustainability in Marine Finfish Aquaculture**. *Frontiers in Marine Science*, v. 8, p. 666662, 21 abr. 2021. . :<https://www.frontiersin.org/journals/marinescience/articles/10.3389/fmars.2021.666662/full>. Acesso em: 5 jun. 2025.

CHEN, S. et al. **Quantifying nutrient recovery efficiency and loss from compost-based urban agriculture**. PMC, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7122751/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

DANAHER, Jason J.; PICKENS, Jeremy M.; SIBLEY, Jeffrey L. **Petunia Growth Response to Container Substrate Amended with Dewatered Aquaculture Effluent**. *HortTechnology*, v. 23, n. 1, p. 57-66, 2013. DOI: 10.21273/HORTTECH.23.1.57. Disponível em: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.1.57>. Acesso em: 15 jun. 2025.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G. de; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 1, cap. 10, p. 95-116. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1087262>. Acesso em: 15 jun. 2025.

EKREN, S. et al. **The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum* L.)**. *Agricultural Water Management*, v. 109, p. 155–161, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/download/46953381/The_effect_of_different_irrigation_water20160702-22360-4mpnbe.pdf. Acesso em: 24 out. 2025.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **A Statistical Manual For Forestry Research**. FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x6831e/x6831e07.htm>. Acesso em: 5 jun. 2025.

HASAN, M. R.; NEW, M. B. **On-farm composting methods**. FAO Fisheries Technical Paper, n. 529. Roma: FAO, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/4/y5104e/y5104e05.htm>. Acesso em: 5 jun. 2025.

HOTHORN, Ludwig A. **Statistics in Toxicology Using R**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. 233 p. ISBN 978-1-4987-0128-0. Disponível em: <https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.1201/b19659&type=googlepdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

IMAKUMBILI, Matema L. E. **Making water stress treatments in pot experiments: An illustrated step-by-step guide**. [S.l.], May 16 2019. Disponível em: <https://www.protocols.io/view/making-water-stress-treatments-in-pot-experiments-dm6gp8m9jlp/v1>. Acesso em: 24 out. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL (IPEDF Codeplan). **Caracterização da agricultura urbana e periurbana do Distrito Federal**. Brasília, DF: IPEDF Codeplan, 2023. Disponível em: <https://ipe.df.gov.br/documents/d/ipedf/relatorio-caracterizacao-da-agricultura-urbana-e-periurbana-do-distrito-federal-pdf>. Acesso em: 26 fev. 2026.

KAMAL, A. et al. **Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents—What Can We Learn from the Past for the Future?** Sustainability, v. 6, n. 2, p. 836-856, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/6/2/836>. Acesso em: 5 jun. 2025.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 26 fev. 2026.

KELLY, J. et al. **Impact of Composting Methods on Nitrogen Retention and Losses during Dairy Manure Composting**. PMC, 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6765887/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

KIM, J. et al. **Maintaining a constant soil moisture level can enhance the growth and phenolic content of sweet basil better than fluctuating irrigation**. Agricultural Water Management, v. 242, p. 106396, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377420302651>. Acesso em: 24 out. 2025.

MAVROGIANOPOULOS, G. N.; FRANGOUDAKIS, A.; PANDELAKIS, J. **Irrigation frequency and total water application with trickle and furrow systems**. Sciencedirect, 1976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0378377476900044>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MEDEIROS, Damiana Cleuma; MARQUES, Luciano Façanha; DANTAS, Maeli Rayane da Silva; MOREIRA, Joserlan Nonato; AZEVEDO, Celicina Maria da Silveira Borges. **Produção de mudas de meloeiro com efluente de piscicultura em diferentes tipos de substratos e bandejas**. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 5, n. 2, p. 65-71, 2010. Disponível em: https://orgprints.dk/id/eprint/24504/1/Medeiros_Produ%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 29 jun. 2025.

MOUSTAFA, M. A. H. **EFFECT OF COMPOST AND SOME STIMULATING SUBSTANCES ON LEAVES AND SOME CHEMICAL COMPOSITION OF JOJOBA PLANT**. ResearchGate, 2022. Disponível em:

https://www.researchgate.net/figure/Field-layout-of-various-treatments-and-replications-in-Randomized-Complete-Block-Design_fig1_304169795. Acesso em: 5 jun. 2025.

MULAZZANI, L. et al. **Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth. Reviews in Aquaculture**, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23308249.2021.1897520>. Acesso em: 5 jun. 2025.

NAYAR, S. et al. **Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: The role of plants and substrate**. ResearchGate, fev. 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/9005944_Treatment_of_freshwater_fish_farm_effluent_using_constructed_wetlands_The_role_of_plants_and_substrate. Acesso em: 5 jun. 2025.

OKLAHOMA STATE UNIVERSITY. **Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture**. OSU Extension, 1 mar. 2017. Disponível em: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture.html>. Acesso em: 5 jun. 2025.

PLANT BREEDING AND GENOMICS. **Randomized Complete Block Design. Extension**, 2023. Disponível em: <https://plant-breeding-genomics.extension.org/randomized-complete-block-design/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

PUKELSHEIM, F.; RIEDER, S. **Efficient rounding of approximate designs**. *Biometrika*, v. 79, n. 4, p. 763-770, 1992. Disponível em: <https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/18219/file/18219.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

SAMARAS, P. et al. **Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review**. ScienceDirect, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277242712100022X>. Acesso em: 5 jun. 2025.

SONESSON, U. et al. **Recycling of Organic Wastes through Composting: Process Performance and Compost Application in Agriculture**. Agronomy, v. 10, n. 11, p. 1838, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1838>. Acesso em: 5 jun. 2025.

TIQUIA, S. M.; RICHARD, T. L.; HONEYMAN, M. S. **Effects of windrow turning and seasonal temperatures on composting of hog manure from hoop structures**. Environmental Pollution, v. 117, n. 2, p. 239–250, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593332108618048>. Acesso em: 26 fev. 2026.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Composting at Home**. EPA, 17 abr. 2013. Disponível em: <https://www.epa.gov/recycle/composting-home>. Acesso em: 5 jun. 2025.

UNIVERSITY OF GEORGIA. **Designing Research and Demonstration Tests for Farmers' Fields**. UGA Cooperative Extension, 2024. Disponível em: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=B1177&title=designing-research-and-demonstration-tests-for-farmers-fields>. Acesso em: 5 jun. 2025.

VANDECASTEELE, B. et al. **An experimental investigation of the composting process in an innovative home composting System: The influence of additives**. ScienceDirect, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397623000187>. Acesso em: 5 jun. 2025.

WU, Y. et al. **Recognizing the challenges of composting: Critical strategies for control, recycling, and valorization of nitrogen loss**. ScienceDirect, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344923003075>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ZHAO, Y. et al. **Application of Optimization and Modeling for the Composting Process Enhancement**. Processes, v. 10, n. 2, p. 229, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/2/229>. Acesso em: 5 jun. 2025.