

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

TATIANA RAMPINI VEIGA

**Análise do Potencial de Contaminação por Chorume Proveniente da Compostagem, em
Pequena Escala, de Resíduos Sólidos Urbanos**

São Paulo

2022

**Análise do Potencial de Contaminação por Chorume Proveniente da Compostagem, em
Pequena Escala, de Resíduos Sólidos Urbanos**

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Prof. Luís Fernando Amato Lourenço

São Paulo

2022

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

Catalogação na Publicação

Veiga, Tatiana Rampini

Análise do Potencial de Contaminação por Chorume Proveniente da Compostagem, em Pequena Escala, de Resíduos Sólidos Urbanos / T. R. Veiga -- São Paulo, 2022.

39 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Compostagem 2.Chorume 3.Contaminação 4.Resíduos Urbanos
5.Resíduos Orgânicos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

Rampini Veiga, Tatiana. Análise do Potencial de Contaminação por Chorume Proveniente da Compostagem, em Pequena Escala, de Resíduos Sólidos Urbanos. 2022. 39 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Estima-se que 50% de todo o resíduo sólido urbano (RSU) produzido no Brasil seja composto por fração orgânica e que, anualmente, apenas 0,5% do total é reciclado por compostagem. A compostagem vem como uma alternativa substancial para a redução dos impactos gerados pela destinação inadequada dos RSU, entretanto é necessário entender qual o comportamento e as características associadas ao chorume produzido ao longo do processo de compostagem. O trabalho conta com uma revisão bibliográfica dos estudos realizados acerca da composição do chorume gerado pela compostagem, em pequena escala, de restos de comida. A técnica de compostagem em leiras estáticas com aeração natural é a metodologia mais recomendada para a aplicação em pequena escala devido sua abordagem ser mais adequada para degradação de restos de comida, além de ser mais acessível que as demais técnicas e de mais fácil controle das condições de aeração, temperatura e produção de chorume. Os resultados revelaram que os principais contaminantes encontrados no chorume são referentes à alta concentração de matéria orgânica e nutrientes (N, P e K) e à ocorrência de metais pesados (Cd, Pb, Hg e Cr) e contaminantes orgânicos. Entretanto, essas concentrações anômalas podem ser evitadas ao garantir as condições ideais do processo de compostagem (principalmente taxa de aeração e temperatura), segregar o resíduo orgânico na fonte e impedir que o chorume encontre diretamente um corpo d'água. Além disso, são analisadas situações hipotéticas que consideram três diferentes tipos de solo, com o objetivo de representar como seria a dinâmica da infiltração de um chorume potencialmente contaminado no solo e a sua capacidade de redução das concentrações contaminante. Essas análises revelaram que o solo argiloso é o mais indicado para que ocorra a infiltração do chorume em virtude do seu baixo coeficiente de permeabilidade que permite uma lenta infiltração e assim maior retenção e biodegradação dos potenciais contaminante. Por fim, conclui-se que apesar da existência do potencial de contaminação, ao comparar com os principais métodos de destinação final adotados no Brasil (lixão a céu aberto e aterros controlados), a compostagem é considerada mais vantajosa por viabilizar o controle e mitigação dos riscos associados.

Palavras-chave: Compostagem. Chorume. Contaminação. Resíduos Urbanos. Resíduos Orgânicos.

ABSTRACT

Rampini Veiga, Tatiana. Analysis of Leachate Contamination Potential from Small Scale Composting of Urban Solid Waste. 2022. 39 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

It is estimated that 50% of all urban solid waste generated in Brazil is composed of organic fraction and, annually, only 0,5% of the total is recycled by composting. Composting comes as a substantial alternative to reduce the impacts of inappropriate waste disposal, however, it is necessary to fully understand how is the behavior and what are the characteristics of the leachate produced during the composting process. This study shows a bibliographic review of researches carried out on the composition of leachate generated by composting, on a small scale, of food scraps. The technique of composting in static windrows with natural aeration is the most recommended methodology for small scale because its approach is more suitable for food waste degradation, besides it is more affordable than other techniques and it is also easier to control the composting conditions, such as aeration, temperature and leachate production. The results show that the main contaminants found in leachate was due to high concentration of organic matter and nutrients (N, P, K) and also the occurrence of heavy metals (Cd, Pb, Hg and Cr) and organic contaminants. However, these anomalous concentrations can be avoided by ensuring the ideal conditions for the composting process (mainly the aeration rate and temperature), segregate the organic waste at the source and prevent the leachate from directly encountering a water body. Besides, hypothetical situations are analyzed that consider three different types of soil, with the aim to represent how it would be the dynamics of infiltration of a potentially contaminated leachate into the soil and its ability to reduce contaminant concentrations. These analyses showed that the clay soil is the most suitable for leachate infiltration due to its low permeability coefficient which allows slow infiltration and thus greater retention and biodegradation of potential contaminants. Finally, it is concluded that despite the existence of potential contamination, when comparing with the main methods of final destination in Brazil (open dump and controlled landfills), composting is considered more advantageous for enabling the control and mitigation of associated risks.

Keywords: Composting. Leachate. Contamination. Urban Waste. Organic Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Atlas da Destinação Final de Resíduos no Brasil 10

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de RSU mundialmente gerado e previsão ao longo dos anos.....	13
Gráfico 2 - Principais tipos de disposição final dos RSU no mundo.	14
Gráfico 3 - Composição do RSU no Brasil.	15
Gráfico 4 - Composição do RSU no Mundo.	15
Gráfico 5 - Concentração de Nitrogênio Total e de NH4+	27
Gráfico 6 - Concentração de Potássio Total	28
Gráfico 7 - Concentração de Fósforo Total e de Fosfato Solúvel em Água.....	28
Gráfico 8 - Resultados de pH e Condutividade Elétrica.....	29
Gráfico 9 - Índice de Germinação	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade das principais unidades de destinação final em operação no Brasil	17
Tabela 2 - Resultados das análises químicas de Romero et al. (2013).....	25
Tabela 3 - Indicadores físicos e químicos do resíduo orgânico.....	26

LISTA DE SIGLAS

ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes
ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BOD – Demanda Bioquímica de Oxigênio
C - Carbono
Ca – Cálcio
Cd – Cádmio
CH⁴ - Metano
Cr – Cromo
Cu – Cobre
Fe – Ferro
H - Hidrogênio
H₂S – Sulfeto de Hidrogênio
K - Potássio
Mg – Magnésio
MMA – Ministério do Meio Ambiente
Mn – Manganês
N – Nitrogênio
Na – Sódio
NH₃ - Amônia
NH₄ - Amônio
Ni – Níquel
O – Oxigênio
P – Fósforo
PAH – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
Pb – Chumbo
PCB – Bifelinas Policloradas
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
S – Enxofre
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
Zn – Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
3. JUSTIFICATIVA	12
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1 PANORAMA GERAL DOS RSU.....	13
4.2 PRINCIPAIS UNIDADES DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU.....	16
4.3 RECICLAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS	18
4.4 COMPOSTAGEM EM PEQUENA ESCALA.....	20
4.5 COMPOSIÇÃO DO CHORUME DA COMPOSTAGEM	21
5. MATERIAIS E MÉTODOS	24
6. RESULTADOS	25
7. DISCUSSÕES	30
7.1 COMPOSIÇÃO DO CHORUME.....	30
7.2 SITUAÇÕES HIPOTÉTICAS DE INFILTRAÇÃO DE CHORUME NO SOLO	33
8. CONCLUSÕES.....	34
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

O aumento da produção de resíduos sólidos, tanto orgânicos quanto inorgânicos, está atrelado ao crescimento socioeconômico. Atualmente a produção mundial de resíduos sólidos urbanos (RSU) é de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas por ano, e o cenário previsto para 2050 não é promissor (WORLD BANK GROUP, 2018). Segundo o relatório do World Bank Group (2018) a estimativa é de que a taxa de geração de lixo para 2050 aumente em 69,15%, passando de 2,01 bilhões de toneladas por ano para 3,40 bilhões de toneladas, o que é mais do que o dobro da taxa de crescimento populacional esperada para o mesmo ano, onde calcula-se que a população mundial cresça 28,95% passando de 7,6 bilhões de pessoas para 9,8 bilhões.

No que se refere ao Brasil, em 2019 foram coletadas mais de 65 milhões de toneladas de RSU, desse montante, somente 1,6 milhão de toneladas (2,4% do total) foram recicladas e 15,9 milhões de toneladas (24,4% do total) tiveram como destino final unidades inadequadas como aterros controlados e lixões (SNIS, 2020). Atualmente existem cerca 2.612 lixões ativos espalhados por todo o território brasileiro, e nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste essa é a principal forma de destinação final utilizada pelos municípios (ABETRE, 2020; Figura 1).

Figura 1- Atlas da Destinação Final de Resíduos no Brasil



Legenda: Municípios em vermelho utilizam como principal destinação final os lixões. Municípios nas demais cores utilizam como principal destinação final aterros sanitários

Fonte: Modificado de ABETRE, 2020

Quanto a composição dos RSU, estima-se que cerca de 80% seria passível de reciclagem, sendo a fração orgânica o principal componente, correspondendo a praticamente 50% de todo o lixo produzido (MMA, 2019; Gráfico 1). No entanto, a reciclagem de compostos orgânicos é irrigária, apenas 305 mil toneladas foram recicladas no ano de 2019 (SNIS, 2020), isto significa que dos possíveis 50% somente 0,5% de todo resíduo descartado no Brasil foi recuperado.

Além da insignificante recuperação dos resíduos capazes de serem reciclados e da destinação inadequada, o sistema de manejo de resíduos sólidos do Brasil comporta cada vez menos a carga de resíduos produzidos. A alta demanda exigida e a reduzida capacidade nos grandes centros urbanos fazem com que muitos municípios “exportem” seus RSU para outros municípios vizinhos (SNIS, 2020). Essa prática vem crescendo ao longo dos anos e segundo o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2020), em 2019 cerca de 1.944 municípios exportaram parcial ou integralmente seus resíduos, ou seja, aproximadamente em 35% das cidades brasileiras ocorreu fluxo intermunicipal de RSU.

Uma das alternativas existentes para minimizar o impacto da destinação inadequada, e que abrange a maior parcela dos RSU, é a adoção da prática de compostagem de resíduos orgânicos. As técnicas de compostagem são baseadas na reciclagem da fração orgânica através da sua biodecomposição por microrganismos, invertebrados e pequenos animais, até atingirem um produto final estabilizado (INÁCIO e MILLER, 2009).

Diversas são as tecnologias de compostagem utilizadas para o tratamento dos resíduos orgânicos. Inácio e Miller (2009) listam os quatro principais grupos de compostagem, que apresentam em si variações na metodologia e tecnologias utilizadas: Leiras Estáticas com Aeração Natural; Leiras Estáticas com Aeração Forçada; Compostagem com Revolvimento de leiras; e Compostagem em Reatores (confinada).

O resultado da compostagem da fração orgânica dos RSU se resume basicamente à um composto orgânico homogêneo (adubo orgânico), rico em substâncias húmicas e elementos minerais, e ao lixiviado (chorume) que é formado durante o processo de transformação (INÁCIO e MILLER, 2009). De acordo com a técnica escolhida, com a maneira em que o processo de compostagem é conduzido e, principalmente, com a composição inicial do resíduo orgânico, o produto final (adubo e chorume) terá diferentes propriedades (INÁCIO e MILLER, 2009; CHATTERJEE *et al.*, 2013).

Como todo processo que envolve atividades antrópicas e o meio ambiente, é necessário analisar os possíveis impactos à saúde humana e ao ecossistema. O principal problema associado ao chorume é a possível alta concentração de sais, de matéria orgânica e de amônia

(CHATTERJEE *et al.*, 2013; INÁCIO e MILLER, 2009; ROMERO *et al.*, 2013). Além disso, caso o resíduo orgânico seja composto por metais pesados ou outros contaminantes, a matéria orgânica presente no lixiviado pode vir a facilitar o transporte destes componentes, que até então seriam imóveis no composto orgânico, e fazer com que atinjam corpos de águas superficiais e/ou subterrâneas (CHATTERJEE *et al.*, 2013; INÁCIO e MILLER, 2009).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar o potencial de contaminação do solo e da água subterrânea pelo chorume oriundo da compostagem de resíduos urbanos realizada em pequena escala por comunidades urbanas, através da comparação dos resultados de análises químicas do chorume, obtidos a partir de revisão bibliográfica, com os valores orientadores da CETESB e do Ministério da Saúde e identificar se estes estão acima ou abaixo do permitido.

Como objetivos secundários o plano de trabalho proposto inclui analisar, através de situações hipotéticas, como seria o comportamento do chorume lixiviado, frente ao potencial contaminante, em três diferentes tipos de solo.

3. JUSTIFICATIVA

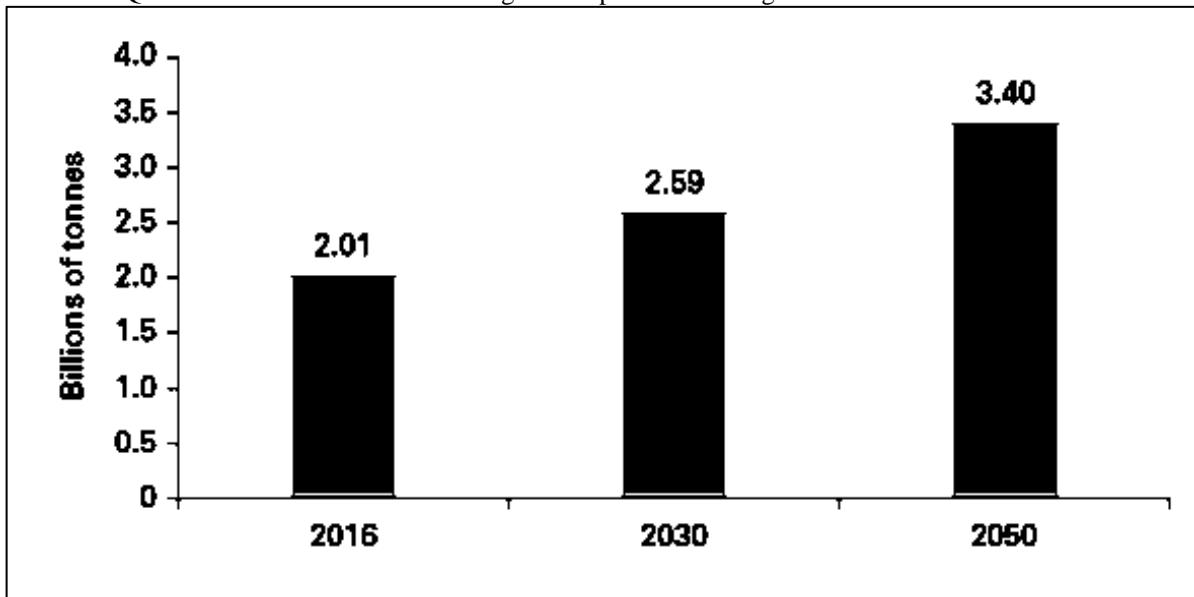
É evidente que as questões acerca da destinação final dos RSU são críticas e, caso nada seja feito a respeito, a tendência para os próximos anos é que essa situação se agrave com o aumento da geração de resíduos. Em vista disso, é fundamental o planejamento sustentável para a disposição final dos RSU. Como 50% de todo o resíduo produzido é composto pela fração orgânica (ABRELPE, 2020; MMA, 2019; SNIS 2020; WORLD BANK GROUP, 2018), a compostagem realizada em comunidades urbanas vem como alternativa substancial para a redução dos impactos gerados pelos outros métodos de disposição. Sendo assim, é necessário entender quais as características do chorume gerado pela compostagem de RSU por pequenas comunidades para que se discuta os benefícios e malefícios dessa prática em comparação com as demais técnicas comumente adotadas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PANORAMA GERAL DOS RSU

O panorama mundial e do Brasil, previsto para as próximas décadas, não é favorável em relação à geração de lixo urbano caso o ser humano não mude a maneira como enfrenta essa problemática (WORLD BANK GROUP, 2018; ABRELPE, 2020). Conforme a urbanização se intensifica, a produção de lixo segue o mesmo caminho, calcula-se que em 2050 a geração de RSU mundial alcançará a marca de 3,40 bilhões de toneladas (WORLD BANK GROUP, 2018), um crescimento de mais de 59% ao se comparar com a produção em 2016 (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Quantidade de RSU mundialmente gerado e previsão ao longo dos anos.



Legenda: Quantidade, em bilhões de toneladas, de RSU mundialmente produzidos no ano de 2016 e as previsões para os anos de 2030 e 2050.

Fonte: Modificado de World Bank Group (2018)

No Brasil, a quantificação da geração de RSU diverge de acordo com diferentes instituições, no entanto, todas relatam significativo aumento ao longo dos anos. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE; 2020), em uma década (análise entre os anos de 2010 a 2019) o Brasil registrou um aumento

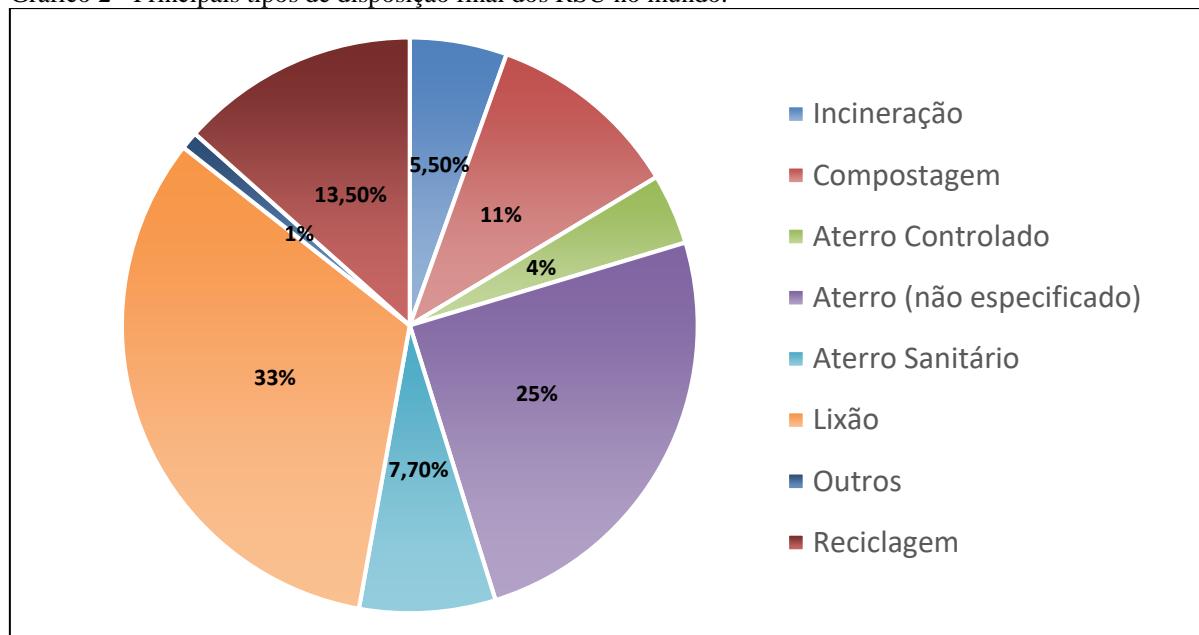
de cerca de 12 milhões de toneladas, onde em 2010 a geração foi de 67 milhões de toneladas e em 2019 de 79 milhões de toneladas. Já o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS; 2020) descreve em seu relatório de “Diagnóstico do Manejo De Resíduos Sólidos Urbanos”, que em 2010 foram coletadas 53 milhões de toneladas de RSU e, em 2019, 65 milhões de toneladas.

O fato é que mais de 60 milhões de toneladas de lixo são produzidas anualmente no Brasil e apenas uma parcela ínfima é reciclada e grande parte tem como destino final unidades inadequadas. As principais unidades de destinação final utilizadas no Brasil são o Aterro Sanitário, Aterro Controlado e Lixão, onde apenas o aterro sanitário é considerado adequado devido aos seus sistemas de proteção ambiental e segurança do trabalho (SNIS 2020).

Os dados do SNIS (2020) revelam que em 2019 15,9 milhões de toneladas (24,5%) tiveram como destino final unidades inadequadas como aterros controlados e lixões, e os dados da ABRELPE (2020) apontam para cerca de 29,5 milhões de toneladas (37,3%) de lixo indevidamente descartadas. Do total de resíduos, apenas 1,6 milhão de toneladas foram recicladas em todo o país (SNIS 2020).

Em comparação com o cenário mundial, o quadro brasileiro não diverge muito. O World Bank Group (2018) caracteriza o padrão global de destinação final dos resíduos, onde 33% do lixo é disposto em lixões a céu aberto e somente 19% é reciclado, sendo 13,5% reciclagem de material seco e apenas 5,5% reciclagem de matéria orgânica por compostagem (Gráfico 2).

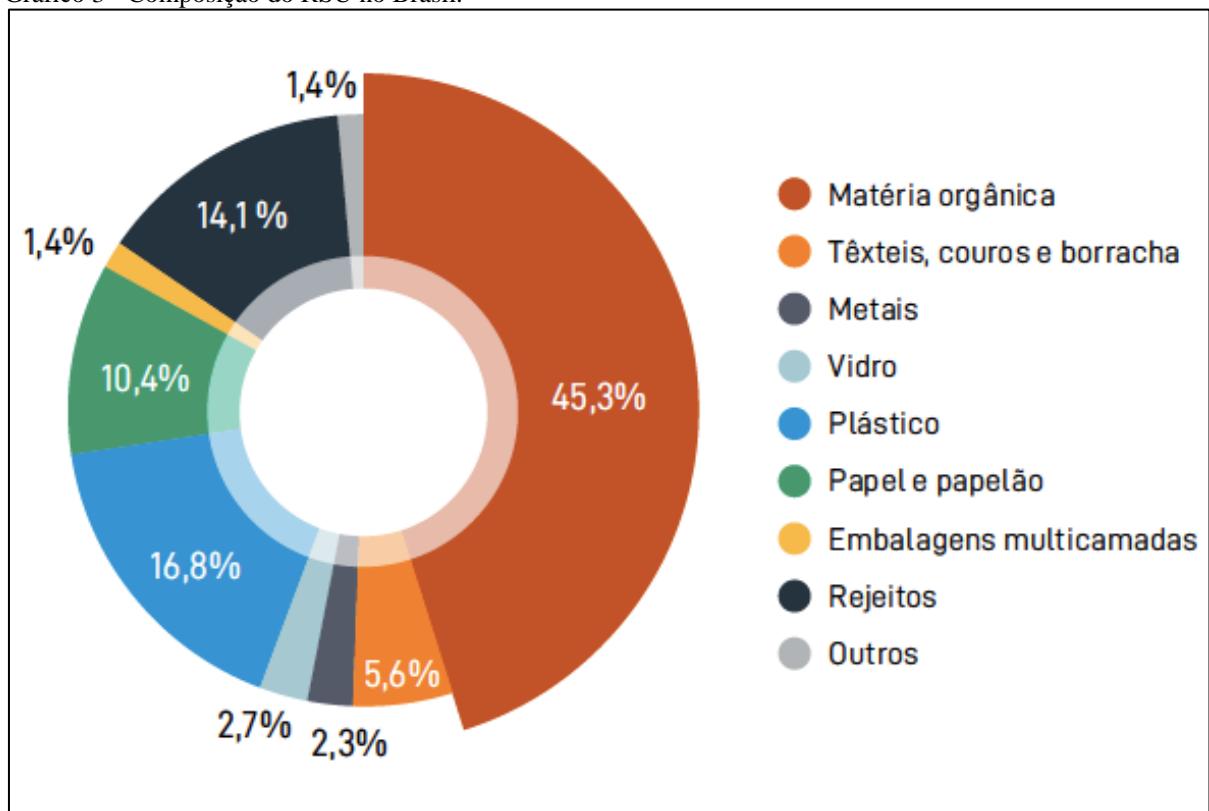
Gráfico 2 - Principais tipos de disposição final dos RSU no mundo.



Legenda: Porcentagem RSU destinado em cada um dos principais tipos de destinação final no mundo.
Fonte: Modificado de World Bank Group (2018)

Para melhor gerenciamento dos RSU, é necessário entender qual a composição e sua quantidade, para assim determinar as melhores estratégias de coleta seletiva e disposição final. Tanto mundialmente quanto no Brasil, a parcela que seria passível de reciclagem (matéria orgânica, metais, vidros, plástico, papel e papelão) compreende cerca de 80%, onde sozinha a fração orgânica corresponde a, aproximadamente, 50% de todo o resíduo gerado (ABRELPE, 2020; MMA, 2019; SNIS 2020; WORLD BANK GROUP, 2018; Gráficos 3 e 4). Essa fração orgânica dos resíduos urbanos é composta principalmente por restos de alimentos domiciliares e de restaurantes (vegetais e animais) e podas de árvores (ABRELPE, 2020; INÁCIO E MILLER, 2009; REIS, 2005; SILVA ET AL. 2006; SNIS 2020).

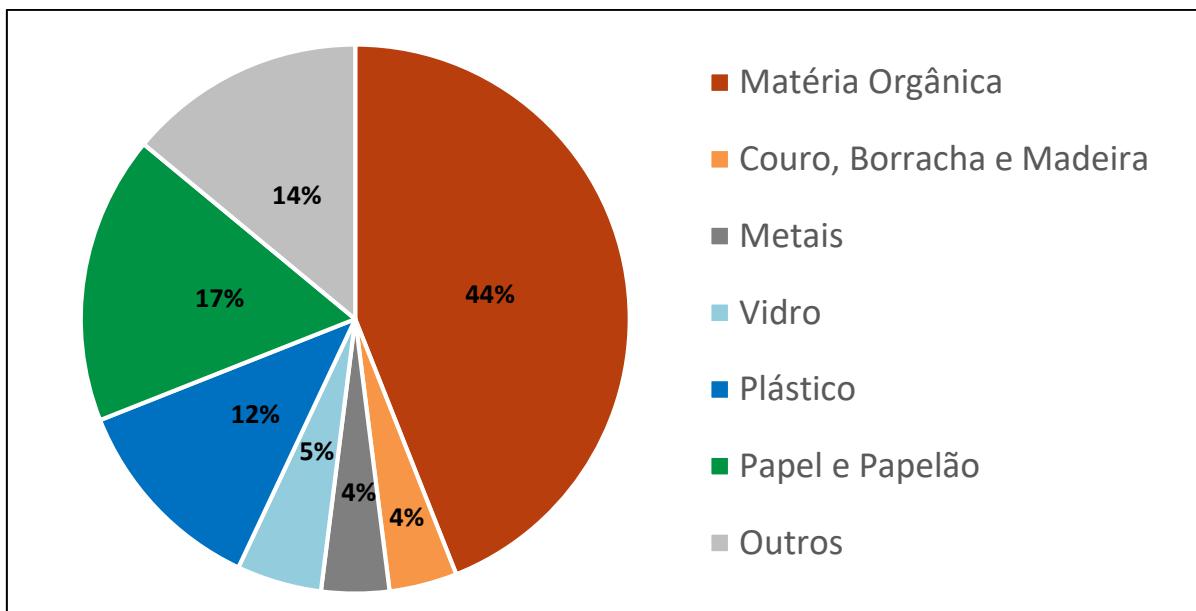
Gráfico 3 - Composição do RSU no Brasil.



Legenda: Porcentagem da composição do RSU no Brasil, com destaque para a fração orgânica que compreende cerca de metade de todo o lixo.

Fonte: Modificado de ABRELPE (2020).

Gráfico 4 - Composição do RSU no Mundo.



Legenda: Porcentagem da composição do RSU no mundo, com destaque para a fração orgânica que compreende cerca de metade de todo o lixo.

Fonte: Modificado de World Bank Group (2018).

4.2 PRINCIPAIS UNIDADES DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU

As principais unidades de disposição final de RSU utilizadas no Brasil são os lixões, aterros controlados e aterros sanitários (ABRELPE, 2020; SNIS, 2020). Os lixões são considerados ambientalmente inadequados, uma vez que os resíduos são depositados no solo e a céu aberto sem que haja controle algum, gerando gases e lixiviados tóxicos além de proliferação de vetores de doença, além de serem receptores de todo tipo de lixo (MMA; SNIS 2020). Os aterros controlados, apesar de apresentarem um mínimo controle, também são ambientalmente inadequados, pois sua disposição se dá diretamente no solo e não possuem medidas de engenharia para controle dos gases e do lixiviado (MMA). Já os aterros sanitários são considerados ambientalmente adequados por possuírem sistemas de proteção e controles ambientais, como a drenagem do chorume e dos gases tóxicos além de medidas de segurança do trabalho (MMA; SNIS 2020).

Para o ano de 2019, o SNIS (2020) expõe que do total de 4.262 unidades de processamento, os lixões e os aterros controlados somam 1.694 unidades (39,8% do total) e o aterro sanitário apenas 621 unidades (14% do total; tabela 1), o que revela que quase metade (39,8%) das unidades de destinação final são inadequadas. Segundo a ABETRE (2020), atualmente o

número total de lixões ativos no Brasil pode chegar a 2.612 lixões, também indicando que a maior parte das unidades de destinação final são inadequadas.

Tabela 1- Quantidade das principais unidades de destinação final em operação no Brasil

Tipo de unidade de processamento	Total de unidades na amostra
Lixão	1.114
Aterro controlado	580
Aterro sanitário	621
Total – 2019	4.262
	100,0%

Legenda: Quantitativo das três principais unidades de destinação final que estavam em operação no ano de 2019 e total das unidades existentes no Brasil, além das três principais.

Fonte: Modificado de SNIS (2020).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) proíbe a destinação de resíduos a céu aberto e define que uma disposição final ambientalmente adequada é aquela que tem sua “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos”.

A primeira proposta da PNRS determinava que todos os municípios brasileiros deveriam implementar uma disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos até o ano de 2014 (BRASIL, 2010). No entanto, em 2020 a Lei nº 14.026 altera esse prazo para até 2024 de acordo com a população dos municípios (BRASIL, 2020).

A realidade é que, conforme demonstrado pelo SNIS (2020) e pela ABETRE (2020), o panorama atual está muito distante do proposto pela PNRS. Segundo dados da ABRELPE (2020) em 10 anos a disposição inadequada aumentou em 16%, impactando diretamente a saúde de 77,65 milhões de brasileiros e refletindo na taxa de reciclagem nacional que se manteve próxima a 4% durante todo esse período.

Além da ausência de políticas públicas para a adoção do que foi proposto pela PNRS (não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos) há uma lacuna em relação a capacidade dos aterros sanitários suportarem toda a carga de RSU que seria destinada aos lixões e aos aterros controlados.

4.3 RECICLAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Embora seja o principal componente do RSU, a matéria orgânica é o composto que menos se recicla no Brasil. Segundo o SNIS (2020), em 2019 somente 305 mil toneladas foram recicladas em todo o território brasileiro, revelando tamanha carência de investimentos e incentivos na coleta seletiva e tratamento do principal constituinte do lixo urbano.

Além de desafogar as unidades de destino final de lixo, o adubo resultante da reciclagem do resíduo orgânico também pode ser utilizado como composto orgânico para o uso agrícola, atuando como excelente fertilizante (CHATTERJEE ET AL., 2013; INÁCIO E MILLER, 2009; REIS, 2005; SILVA ET AL. 2006).

A reciclagem dos resíduos orgânicos se dá através de técnicas de compostagem baseadas na biodecomposição por microrganismos, invertebrados e pequenos animais. Segundo Inácio e Miller (2009) as quatro principais metodologias de compostagem conhecidas são as leiras estáticas com aeração natural, leiras estáticas com aeração forçada, compostagem com revolvimento de leiras e compostagem em reatores (confinada). Outra abordagem empregada é a vermicompostagem, que tem como base a utilização de minhocas que consomem e digerem a matéria orgânica promovendo assim sua degradação (REIS, 2005).

- Leiras Estáticas com Aeração Natural

A principal característica desse método é o não revolvimento e a ausência de sistema de aeração externo (INÁCIO e MILLER, 2009). A peça-chave para o bom resultado dessa técnica é a montagem inicial das leiras, onde o material de sua estrutura e de cobertura deve ser de baixa densidade, como aparas de madeiras e podas de árvore, que garantirão a sustentação e porosidade do sistema e permitirão a eficiente aeração durante a fase aeróbica (INÁCIO e MILLER, 2009). Estudos mostraram que para resíduos orgânicos urbanos, essa metodologia de compostagem se mostrou eficiente, sendo capaz de suportar uma carga contínua de resíduos além de manter controlado os vetores, odores e percolados (BUTTENBENDER, 2004; INÁCIO e MILLER, 2009).

- Leiras Estáticas com Aeração Forçada

Esse método é uma variação das leiras estáticas com aeração natural tendo como base a ausência de revolvimento constante, a única diferença é a instalação na base das leiras de um sistema de aeração (equipamentos de insuflação e/ou aspiração de ar; INÁCIO e MILLER, 2009). Apesar da aeração forçada a estruturação da leira e o material utilizado continuam sendo de tamanha importância uma vez que, para que haja um fluxo de ar suficiente, é necessário que a porosidade da leira seja mantida (INÁCIO e MILLER, 2009). Sendo assim, também é uma técnica indicada para resíduos orgânicos urbanos, entretanto menos difundida no Brasil por conta dos custos de implantação do sistema de aeração (INÁCIO e MILLER, 2009).

- Compostagem com Revolvimento de Leiras

Método baseado no constante revolvimento das leiras por maquinários com o objetivo de recuperar a aeração da estrutura de compostagem (INÁCIO e MILLER, 2009). Apesar de ser bem difundido no Brasil, esse método apresenta certos pontos de ineficiência revelados pelo rápido esgotamento de oxigênio após o revolvimento, pela emissão de fortes odores, presença de moscas, elevada produção de chorume e necessidade de grande área para realizar revolvimento (INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005). Em relação à aplicação para os resíduos orgânicos urbanos essa técnica não é recomendada, devido a esse material apresentar grande quantidade de água em sua composição e com isso intensificar a geração de chorume e forte emissão de odores por conta do revolvimento, sendo melhor aplicada para restos de poda, grama e folhas secas (INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005).

- Compostagem em Reatores (confinada)

Método de compostagem totalmente mecanizada (aeração e revolvimento), baseado no confinamento dos resíduos orgânicos em reatores biológicos fechados, propiciando melhor controle dos principais parâmetros que influenciam o processo de biodegradação (temperatura, umidade, oxigênio e pH) e também maior controle de odores e de patógenos (INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005). Apesar do menor período de tempo em que o resíduo é transformado, essa técnica tem maiores custos de operação e os sistemas são patenteados, se tornando inviável em muitos dos casos (INÁCIO e MILLER, 2009).

- Vermicompostagem

Método alternativo de compostagem baseado no uso de minhocas como principal agente biodecompositor do resíduo orgânico (REIS, 2005). Essa técnica pode ser utilizada em associação com os demais métodos, onde após a fase termofílica, que elimina os patógenos, as minhocas são inseridas para finalizarem a reciclagem do material orgânico (REIS, 2005). Ou pode ser adotado sozinho, através de um minhocário, onde a decomposição do resíduo orgânico é realizada em pequenas caixas com minhocas (ANJOS, 2015). O minhocário vem como uma alternativa na compostagem caseira sendo facilmente adotado nas residências (casas e apartamentos), uma vez que não produzem mau cheiro e nem atraem vetores, além de ser uma técnica prática de ser aplicada (ANJOS, 2015).

4.4 COMPOSTAGEM EM PEQUENA ESCALA

Neste trabalho, entende-se como compostagem de pequena escala aquela praticada em praças, parques ou pátios pela própria comunidade urbana de forma centralizada, e não aquelas que também são de pequena escala, mas praticadas de forma descentralizadas (composteiras caseiras por exemplo).

Estudos conduzidos na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por Inácio e Miller (2009) mostram que o método de compostagem com leiras estáticas com aeração natural (passiva) apresenta excelente resultado em pequena escala, sendo indicado para a reciclagem de resíduos orgânicos urbanos, desde que todo o processo de compostagem seja bem planejado e executado, sobretudo a fase inicial de montagem das leiras, uma vez que influência diretamente todas as etapas seguintes e também na quantidade de produção de chorume.

Apesar de facilmente aplicada em pequena escala, as minhocas da vermicompostagem não decompõem resíduos que sejam muito ácidos (pH baixo), apresentando melhores resultados na decomposição de estercos ao invés de resíduos orgânicos urbanos (REIS, 2005).

As demais técnicas (Leiras Estáticas com Aeração Forçada; Compostagem com Revolvimento de Leiras; e Compostagem em Reatores (confinada)) não são indicadas para a reciclagem de material orgânico em pequena escala uma vez que além de exigirem maior investimento e maquinário também necessitam de maiores pátios de operação (INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005).

4.5 COMPOSIÇÃO DO CHORUME DA COMPOSTAGEM

O chorume é o líquido formado pela água presente na matéria orgânica e pela água produzida nos processos de biodegradação, sua produção está relacionada principalmente ao tipo de material compostado, à técnica de compostagem e, em alguns casos, às condições climáticas (CHATTERJEE ET AL., 2013; INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005; ROY ET AL., 2018).

Existem diversos estudos acerca da composição química do chorume e do seu potencial de contaminação, entretanto a maioria converge em relação ao principal fator influenciador da composição do chorume: a característica inicial do resíduo orgânico a ser degradado.

Inácio e Miller (2009) em seu livro “Compostagem – Ciência prática para gestão de resíduos orgânicos” afirmam que o chorume proveniente da compostagem é formado principalmente por partículas decantáveis de matéria orgânica, matéria orgânica dissolvida e sais dissolvidos. A principal contaminação associada seria pela alta carga orgânica e altas concentrações de N, P e K que, ao entrarem em contato direto com corpos d’água, podem causar eutrofização. Entretanto, os autores afirmam que o chorume é biodegradável e pode ser tratado pelo próprio solo superficial abaixo do sistema de compostagem, desde que infiltre e não escoa diretamente para corpos d’água. Além disso, outros potenciais contaminantes seriam metais pesados, contaminantes orgânicos e a presença de agentes patogênicos. Para tal, o estudo descreve que mantendo as condições ideais do processo de compostagem (alta atividade biológica aeróbica e termofílica) o volume de chorume produzido tende a ser baixo e as altas temperaturas eliminam o risco de patógenos, o tipo de técnica de compostagem empregada também vai influenciar nesse quesito, onde, por exemplo, as leiras com revolvimento tendem a produzir mais chorume do que as com aeração passiva (sem revolvimento). Em relação aos metais pesados e outros potenciais contaminantes orgânicos, a presença destes está diretamente relacionada com a origem do resíduo orgânico que será compostado. Em suma, os autores declaram que os restos de alimentos podem ser contaminados pelos demais RSU e ao segregar a fração orgânica na fonte reduz muito ou até elimina o risco de contaminação por metais pesados e contaminantes orgânicos.

Chatterjee *et al.* (2013), através de revisões bibliográficas, descrevem que o chorume é formado por materiais dissolvidos e particulados de matéria orgânica e nutrientes (C, H, O, N

e P), podendo conter contaminantes dependendo da condição do resíduo inicial utilizado. Segundo os autores, a contaminação do chorume estaria associada à alta concentração de matéria orgânica e nitrogênio e à presença metais pesados e de materiais fitotóxicos (pesticidas, solventes industriais, propulsores, refrigerantes, degradação de plástico e água de tempestade). Entretanto, ao infiltrar no solo, a alta carga de matéria orgânica e nitrogênio são retidas pelos microrganismos do próprio solo perdendo sua característica poluidora. De acordo com o estudo, em determinadas concentrações os metais pesados são tóxicos para os organismos e o principal problema associado a eles é o seu potencial de acúmulo na cadeia alimentar. A presença de metais pesados no chorume esta relacionado à ocorrência deles no resíduo orgânico inicial, e ao infiltrar no solo grande parte dos metais fica retido no solo superficial logo abaixo da pilha de compostagem, não atingindo a água subterrânea. Em relação aos materiais fitotóxicos, os autores afirmam que a concentração ao longo do processo de compostagem chegou próximo de zero, isso ocorre, pois, as moléculas orgânicas desses materiais são biodegradáveis pelos microrganismos presentes na composteira e também por se ligarem à matéria orgânica do composto ficando menos biodisponível. Além disso, Chatterjee *et al.* (2013) alerta sobre o potencial de liberação de compostos com forte odor e de natureza tóxica quando não mantidas condições aeróbicas nas composteiras, como H_2S , NH_3 , mercaptanos, aminas, CH_4 , acetatos, lactatos e íons metálicos reduzidos. Apesar da existência do potencial contaminante, os autores declaram que a presença de compostos poluidores deve ser monitorada na seleção dos resíduos, isto é, controlar na fonte evitando assim a mistura de resíduos orgânicos compostáveis com resíduos tóxicos.

Romero *et al.* (2013) analisaram composição do chorume coletado a partir de uma planta de compostagem na Espanha, onde os possíveis contaminantes seriam associados a altas concentrações de sais, de NH_4-N e de matéria orgânica. No entanto, os resultados revelaram baixa concentração de metais pesados, ausência de patógenos, alto índice de germinação (indica baixa fitotoxicidade) e adequada quantidade de nutrientes (N, P e K). Similar aos demais estudos, os autores afirmam que a composição do chorume esta diretamente relacionada à natureza da matéria-prima (resíduo orgânico utilizado) e à técnica de compostagem aplicada. A pesquisa ainda compara a utilização do chorume como fertilizante em relação aos fertilizantes produzidos pelo mercado, e revelou que o chorume possui melhores qualidades fertilizadoras e também do ponto de vista econômico.

Reis (2005) detalha os estudos realizados no pátio de compostagem do município de Porto Alegre – RS, onde afirma que os três principais fatores influenciadores da composição do chorume são: as condições locais e operacionais do processo de compostagem; as características

físico-químicas dos resíduos; e os processos físico-químicos internos de decomposição. A autora realizou análises da concentração química do chorume da compostagem de resíduos orgânicos junto com lodos de esgoto para 16 elementos: P, S, N total, Nitrato, Cu, Zn, Fe, Mn, Cr, Cd, Ni, Pb, Ca, K, Mg e Na. Os resultados obtidos foram comparados com dados de chorume de aterros sanitários e revelaram que as concentrações de metais pesados são menores em ordens de grandeza para o chorume oriundo da compostagem e também não ultrapassaram os valores limites orientadores. Reis (2005) atribui como principal fator para a grande diferença na concentração dos metais, a natureza do resíduo de cada unidade de destinação final, onde o material utilizado na unidade de compostagem foi basicamente orgânico, diferente do disposto nos aterros sanitários que era composto por todo tipo de RSU.

Wang *et al.* (2021) estudam a influência da taxa de aeração, durante o processo de compostagem, nas concentrações de materiais tóxicos. Os experimentos foram realizados para quatro diferentes taxas de aeração T1, T2, T3 e T4, com a taxa aumentando de T1 para T4. A toxicidade do composto foi medida através do índice de germinação que é influenciado pela presença de N, K e P, que, apesar de serem nutrientes, em altas concentrações podem ser tóxicos. Os resultados revelaram que quanto mais aerado for o processo, maior é a decomposição de materiais tóxicos e assim maior é o índice de germinação. Além disso, a quantidade de chorume produzido também mostrou ser diretamente influenciada pela aeração do processo, onde quanto menor a taxa de aeração maior a produção de chorume.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 1994) atesta que a natural biodecomposição de materiais orgânicos resulta em chorume com alta concentração de fenóis e com elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Os fenóis não são tóxicos, porém podem gerar odor e afetar o gosto da água, e a elevada DBO faz com que o oxigênio no meio seja rapidamente consumido gerando escassez de O₂ nos corpos d'água. Apesar da concentração anômala, não apresentam risco para a água subterrânea pois durante a infiltração no solo são substancialmente degradados pela biota presente. Outros possíveis contaminantes listados pela agência ambiental seriam os compostos sintéticos tóxicos como PCBs, cordano, pesticida, PAHs, óleo, carvão e gasolina. Os PCBs e o cordano são resistentes a biodegradação e os PAHs ao serem biodegradados formam compostos mais tóxicos que o original. Sendo assim, a solução proposta pela USEPA (1994) é monitorar e controlar o resíduo orgânico inicial.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos propostos, a metodologia adotada teve como foco a revisão bibliográfica, de duração integral, onde foram realizadas busca de dados, argumentos e discussões que permitiram caracterizar, da forma mais representativa possível, a composição do chorume proveniente da compostagem de RSU, atestando assim seu potencial contaminante.

A pesquisa bibliográfica foi realizada através das plataformas Portal de Periódicos Capes, DEDALUS (Banco de Dados Bibliográficos da Universidade de São Paulo), One Search (Banco de Dados Bibliográficos da Universidade da Austrália Ocidental) e eventualmente pelo Google Scholar.

A consulta retornou com mais de 40.000 documentos e foi realizada tanto em português quanto em inglês, as palavras chaves utilizadas foram: compostagem, compostagem de resíduos sólidos urbanos, compostagem em pequena escala, gestão de resíduos sólidos, chorume oriundo da compostagem, lixiviado da compostagem, produtos finais da compostagem, compostagem e contaminação, *composting leachate, contamination of composting leachate, small scale composting, solid urban waste composting e solid urban waste management*.

Desse total, foram selecionados 107 documentos que estivessem relacionados com o tema do trabalho: composição do chorume proveniente da compostagem e seu potencial de contaminação, compostagem em pequena escala e panorama geral do RSU. Após avaliação detalhada do conteúdo dos trabalhos, 48 foram descartados remanescendo 59 artigos e documentos que serviram como base para a análise bibliográfica aqui proposta.

A seleção inicial de 107 documentos e posterior descarte de 48 seguiu a metodologia de não inclusão de estudos que detalham a compostagem de outros resíduos que não resíduos sólidos urbanos. Para pesquisas em escala maior que a proposta neste trabalho, foi analisada sua adequação, quando não possível, o material não foi utilizado. Materiais com metodologia, resultados e/ou discussões inadequadas, sem base científica ou sem argumentos fundamentados, também foram descartados.

O conceito adotado de compostagem em pequena escala compreende a compostagem realizada por comunidades urbanas em praças, pátios ou parques de forma centralizada. As demais técnicas de compostagem de pequena escala, como as realizadas em casas, são aqui consideradas de forma descentralizadas e não são o enfoque do estudo.

Os resultados da composição química do chorume foram analisados para as bibliografias com análises do chorume proveniente da compostagem apenas de restos de comidas. Os

trabalhos que contaram com resultados da compostagem de outros tipos de resíduos orgânicos, como lodos de esgoto, esterco e resíduos orgânicos industriais não foram discutidos.

Os resultados encontrados foram analisados com base nos valores orientadores da Decisão de Diretoria Nº 256/2016/E, de 22 de novembro de 2016 da CETESB e de acordo com a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde que atualiza os valores da “tabela de padrão de potabilidade para substâncias químicas inorgânicas que representam risco à saúde”.

Para as situações hipotéticas foi utilizado como parâmetro comparativo o coeficiente de permeabilidade descrito por Cruz (1996), que define qual a velocidade de infiltração (cm/s) de acordo com o tipo de material do meio. Para cada situação foi presumido a presença de lençol freático logo abaixo da camada de solo.

6. RESULTADOS

Romero *et al.* (2013) realizaram análises em três diferentes amostras: chorume diretamente coletado da compostagem (*raw leachate*), chorume após tratamento anaeróbico (*digested leachate*) e em fertilizante vegetal orgânico-mineral a base de guano (*commercial fertilizer*). A tabela 2 detalha os resultados encontrados pelos autores, para as três amostras, acerca dos 20 parâmetros e elementos analisados: TOC (carbono orgânico total), TN (nitrogênio total), C/N (relação carbono-nitrogênio), P, K, sólidos totais, condutividade, pH, COD (demanda química de oxigênio), TKN (Nitrogênio total de Kjeldahl – N orgânico + N inorgânico), N₄H-N, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, Cr e Cr (VI).

Tabela 2 - Resultados das análises químicas de Romero *et al.* (2013)

	Raw leachate	Commercial fertilizer	Digested leachate
TOC	1900.0 ± 0.2	101.5 ± 0.1	450.1 ± 0.1
TN	626.18 ± 0.7	246.27 ± 0.2	350.0 ± 0.3
C/N	3.04	0.41	1.29
P	1778.0 ± 294.2	244.6 ± 40.4	10.1 ± 1.7
K	640.0 ± 54.7	739.1 ± 35.3	740.0 ± 45.4
Total solids	12,847 ± 216	5305 ± 89	5200 ± 65
Conductivity	8.04 ± 0.10	6.67 ± 0.07	12.10 ± 0.05
pH	6.98 ± 0.01	7.01 ± 0.01	8.01 ± 0.02
COD	15,188 ± 487	48,580 ± 1558	2000 ± 64
TKN	1100.2 ± 0.7	16,500 ± 10.5	850 ± 0.5
NH ₄ -N	650.1 ± 5.9	11,374.11 ± 103.2	780 ± 7.1
Heavy metals			
Cd	0.01	0.14	<0.01
Cu	<0.01	33.02	<0.01
Ni	0.05	0.46	0.08
Pb	0.02	0.12	0.03
Zn	0.5	41.7	0.82
Hg	<0.01	<0.01	<0.01
Cr	0.07	0.21	0.07
Cr (VI)	<0.01	0.02	<0.01

Legenda: Resultados, em mg/L (exceto pH – sem unidade e condutividade – mS/cm), das análises químicas realizadas nas 3 amostras.

Fonte: Modificado de Romero *et al.* (2013)

Segundo os autores, esses resultados demonstraram que o chorume sem tratamento (*raw leachate*) pode ser utilizado como fertilizante para plantas, uma vez que apresentou baixas concentrações de metais pesados, ausência de patógenos, presença adequada de nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) e alto índice de germinação (ROMERO *et al.*, 2013). O chorume tratado por digestão aeróbica não mostrou grande melhorias em comparação com o chorume sem tratamento para ser utilizado como fertilizante (ROMERO *et al.*, 2013).

O trabalho de Wang *et al.* (2021) analisou primeiramente a característica inicial do resíduo orgânico antes de ser compostado, conforme detalhado na tabela 3.

Tabela 3 - Indicadores físicos e químicos do resíduo orgânico

	MC (%)	pH	EC (mS/cm)	TC (g/kg DM) ^a	TN (g/kg DM) ^a	C/N
FW	76 ± 9	5.10 ± 0.08	1.11 ± 0.38	422.70 ± 21.66	33.24 ± 4.01	13.11 ± 1.67

Legenda: Resultados da análise dos indicadores físicos e químicos do resíduo orgânico (FW – Food Waste), onde MC = moisture contente (teor de umidade), EC = eletrical conductivity (condutividade elétrica), DM = dry mass (massa seca), TC = total carbono (carbono total), TN = total nitrogen (nitrogênio total) e C/N = relação carbono-nitrogênio

Fonte: Modificado de Wang *et al.* (2021)

Posteriormente, os autores analisaram, para quatro diferentes condições de aeração (T1, T2, T3 e T4), a quantidade de chorume produzido durante todo o processo de compostagem, as concentrações de N, K e P, pH, condutividade elétrica e o índice de germinação. As condições de aeração variaram de acordo com o tempo em que o sistema de compostagem era ventilado:

T1 – 10 segundos de ventilação com intervalo de 50 minutos

T2 – 1 minuto de ventilação com intervalo de 50 minutos

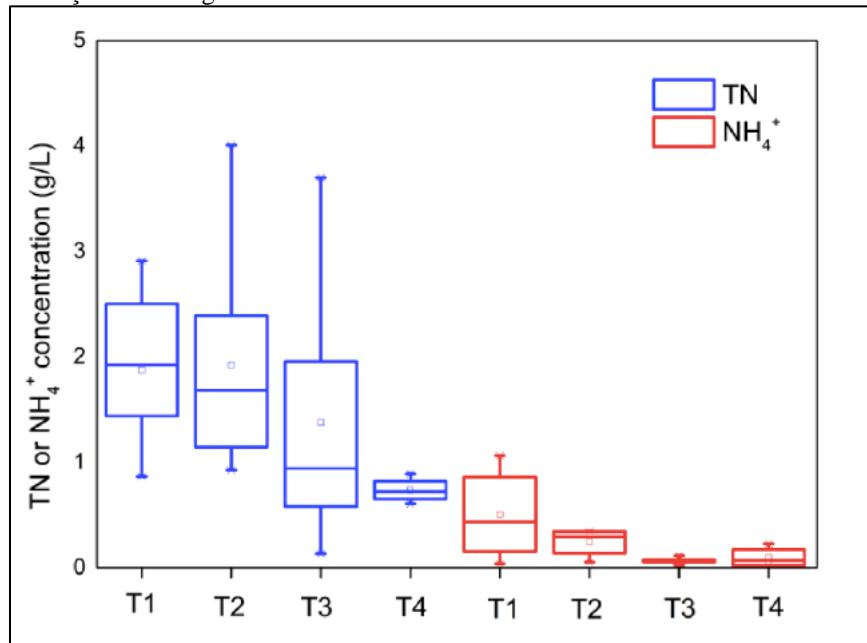
T3 – 2 minutos de ventilação com intervalo de 50 minutos

T4 – 5 minutos de ventilação com intervalo de 50 minutos

Os resultados mostraram que quanto maior a taxa de aeração, menor a produção de chorume, onde para T1 o chorume acumulado foi de 13,44 litros (L), T2 11,5 L, T3 5,13 L e T4 4,11 L. Os autores afirmam que o teor de umidade inicial do resíduo (tabela 3) também influencia diretamente na quantidade de chorume produzido.

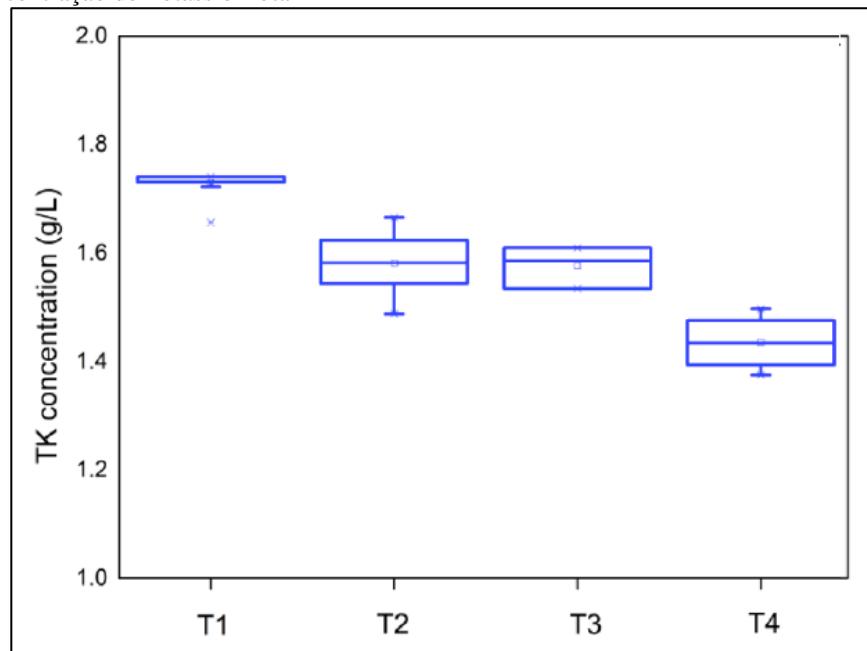
As concentrações de N e K foram similares, variando de 0,13 a 4,01 g/L e de 1,36 a 1,74 g/L, respectivamente. Já as concentrações de P foram menores em até duas ordens de grandeza, variando de 16,32 – 99,75 mg/L. Os gráficos 5, 6 e 7 abaixo detalham as concentrações obtidas de N, K e P para as diferentes taxas de aeração.

Gráfico 5 - Concentração de Nitrogênio Total e de NH₄⁺



Legenda: Concentrações de Nitrogênio Total (TN) e de amônia (NH₄⁺) para as quatro taxas de aeração.
Fonte: Modificado de Wang *et al.* (2021)

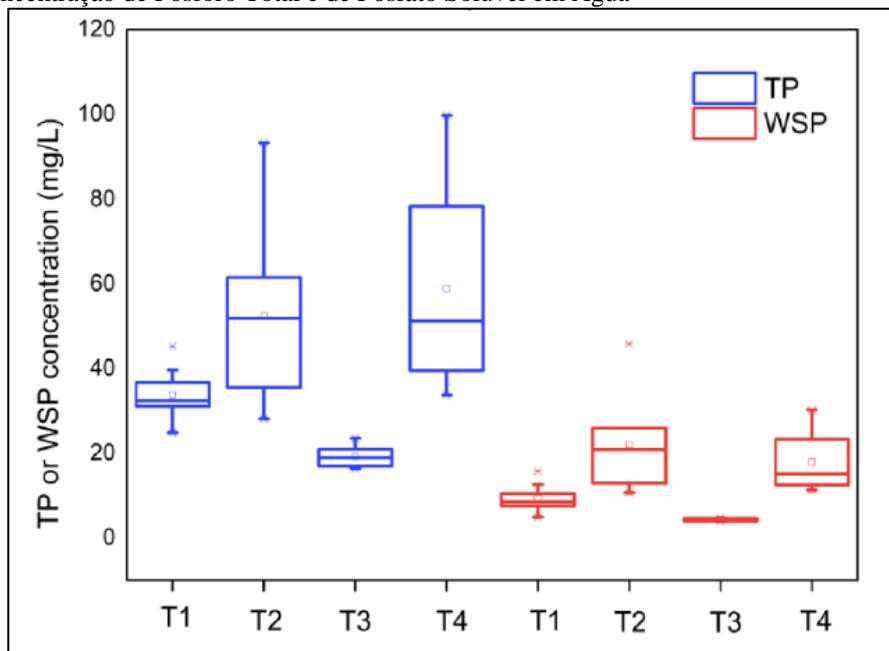
Gráfico 6 - Concentração de Potássio Total



Legenda: Concentrações de Potássio Total (TK) para as quatro taxas de aeração.

Fonte: Modificado de Wang *et al.* (2021)

Gráfico 7 - Concentração de Fósforo Total e de Fosfato Solúvel em Água



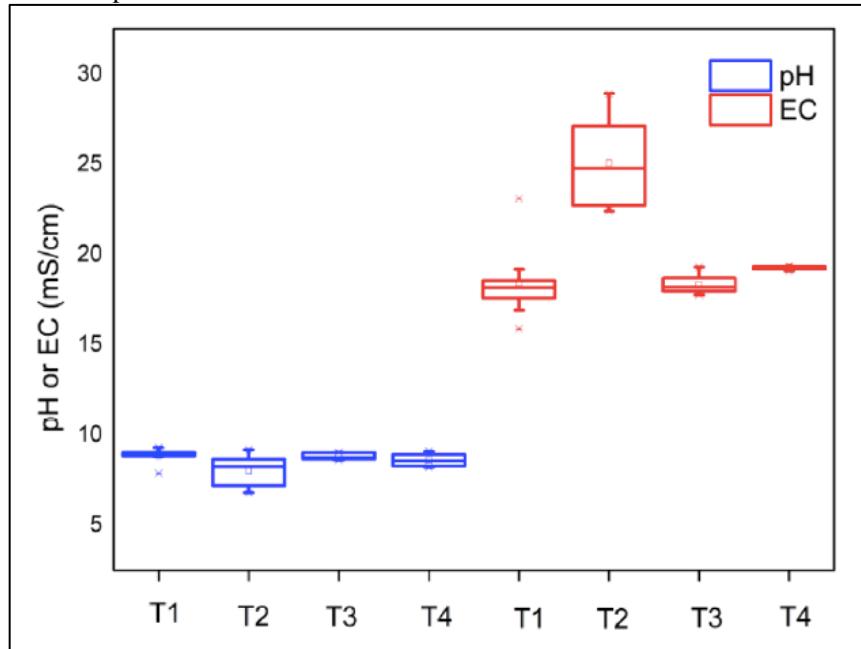
Legenda: Concentrações de Fósforo Total (TP) e de Fosfato Solúvel em Água (WSP – Water Soluble Phosphate) para as quatro taxas de aeração.

Fonte: Modificado de Wang *et al.* (2021)

O gráfico 8 mostra que o pH encontrado para o chorume foi praticamente alcalino para todas as taxas de aeração com pequena variação para neutro, e que a condutividade elétrica variou de 15.89–28.90 mS/cm, com valores menores para as taxas T1, T3 e T4 e maior valor para T2. Em relação ao índice de germinação (gráfico 9), os resultados revelam que quanto

maior a aeração maior índice de germinação, o que indica menor concentração de compostos tóxicos.

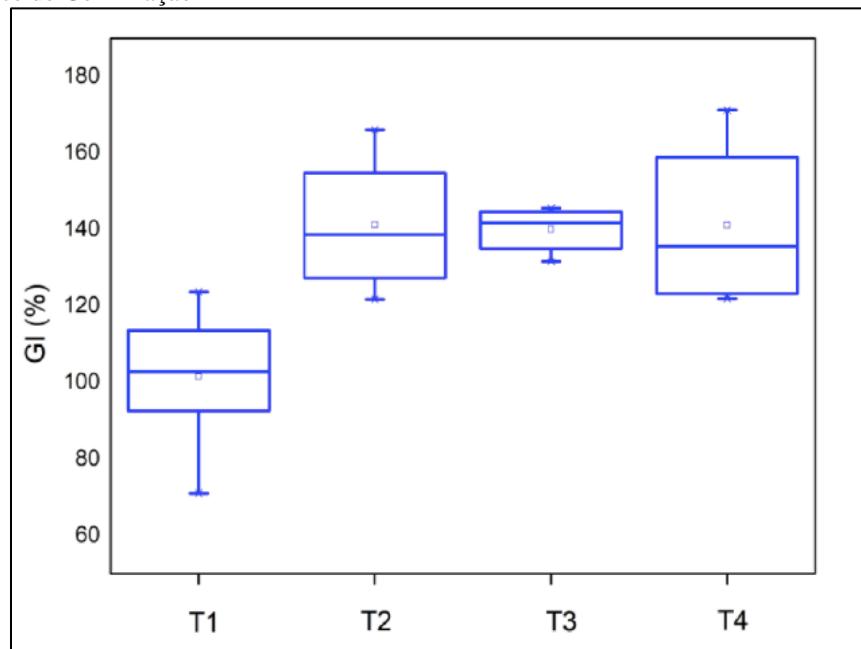
Gráfico 8 - Resultados de pH e Condutovidade Elétrica



Legenda: Valores de pH e de condutividade elétrica (EC) para as quatro taxas de aeração.

Fonte: Modificado de Wang *et al.* (2021)

Gráfico 9 - Índice de Germinação



Legenda: Resultados do índice de germinação (GI) para as quatro taxas de aeração.

Fonte: Modificado de Wang *et al.* (2021)

7. DISCUSSÕES

7.1 COMPOSIÇÃO DO CHORUME

O ponto central abordado nas bibliografias revisadas no item 4.5 é que o principal risco relacionado à contaminação do chorume é proveniente de outros materiais e não do resíduo orgânico em si (CHATTERJEE ET AL., 2013; INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005; ROMERO ET AL., 2013; WANG ET AL., 2021). Os autores afirmam que isto ocorre quando resíduos orgânicos são misturados na fonte com outros RSU não orgânicos, que podem conter contaminantes como metais pesados, contaminantes orgânicos e materiais fitotóxicos. À vista disso, uma maneira de se evitar a contaminação externa seria segregar o lixo orgânico na própria fonte e não misturá-lo com outros tipos de resíduos.

Romero *et al.* (2013) realizou análises de metais pesados do chorume da compostagem de restos de comidas, sem incluir outros tipos de resíduos orgânicos. Ao comparar os resultados encontrados pelos autores com a tabela de padrão de potabilidade da portaria do Ministério da Saúde (MS) GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021, observa-se que a concentração dos metais Cd (0,01 mg/L), Pb (0,02 mg/L), Hg (<0,01 mg/L) e Cr (0,07 mg/L) estão acima do que é permitido para água potável. Os limites definidos pelo MS são de 0,003 mg/L para o Cd, 0,01 mg/L para o Pb, 0,001 mg/L para o Hg e 0,05 mg/L para o Cr. Ao comparar com os valores orientadores para água subterrânea da Decisão de Diretoria N° 256/2016/E, de 22 de novembro de 2016 da CETESB, os metais que estão acima do limite definido são o Cd (0,01 mg/L encontrado e 0,005 mg/L permitido), Pb (0,02 mg/L encontrado e 0,01 mg/L permitido), Hg (<0,01 mg/L encontrado e 0,001 mg/L permitido) e Cr (0,07 mg/L encontrado e 0,05 mg/L permitido).

Apesar de quatro metais (Cd, Pb, Hg e Cr) apresentarem concentrações acima do limite estabelecido, vale destacar que os resultados de Romero *et al.* (2013) são referentes ao chorume coletado diretamente da composteira, e não referentes à água subterrânea com chorume dissolvido em sua composição. Ao infiltrar no solo, os elementos do chorume serão adsorvidos e decompostos e ao entrar em contato com a água subterrânea, será dissolvido, perdendo as características contaminantes (ROMERO ET AL., 2013).

Romero *et al.* (2013) ainda avaliam o potencial de utilização do chorume como fertilizante. Para tal, analisaram a composição do fertilizante comumente utilizado para plantas e

compararam com as concentrações do chorume. Os resultados mostraram que o chorume tem potencial de ser utilizado como fertilizante, uma vez que as concentrações de todos os metais do chorume são menores que as concentrações encontradas no fertilizante comercializado, não apresentaram patógenos, continham nutrientes como N, P e K e alto índice de germinação.

Diante do exposto, o estudo de Romero *et al.* (2013) revela que, apesar de concentrações acima de limites estabelecidos para a água subterrânea, o chorume, além de não ser um contaminante, pode ser utilizado como fertilizante para plantas.

Em relação à contaminação oriunda da própria característica do material orgânico, esse potencial está relacionado à altas concentrações de nutrientes como N, P e K e à grande quantidade de matéria orgânica no chorume (CHATTERJEE ET AL., 2013; INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005; ROMERO ET AL.,2013; WANG ET AL.,2021).

Estudos de Wang *et al.* (2021) e de Romero *et al.* (2013) detalham as altas concentrações de N, P e K encontradas no chorume. Ao entrar em contato direto com os corpos d'água, o excesso de nutriente pode levar à eutrofização do meio (CHATTERJEE ET AL., 2013; INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005; ROMERO ET AL.,2013; WANG ET AL.,2021). Entretanto, ao infiltrar no solo, essas altas concentrações são atenuadas pelos processos de adsorção e degradação do próprio solo (INÁCIO e MILLER, 2009). Além disso, o alto índice de germinação encontrado por Wang *et al.* (2021) e Romero *et al.* (2013), revela que apesar de altas concentrações de nutrientes, o chorume não apresenta características fitotóxicas.

A problemática em torno da quantidade de matéria orgânica presente no chorume, é referente à demanda bioquímica de oxigênio, isto é, quanto maior a quantidade de matéria orgânica no meio, maior é o consumo de oxigênio. À vista disso, a presença de chorume pode fazer com que falte oxigênio no meio caso entre em contato. De forma similar aos nutrientes, ao infiltrar no solo a matéria orgânica excessiva é degradada, e o seu potencial de contaminação eliminado (INÁCIO e MILLER, 2009; ROMERO ET AL.,2013).

Em relação à ocorrência de patógenos no chorume, ao garantir que a fase termofílica se suceda de maneira correta, as altas temperaturas geradas são capazes de eliminar todos os possíveis patógenos existentes no resíduo orgânico (CHATTERJEE ET AL., 2013; INÁCIO e MILLER, 2009; REIS, 2005)

Outra importante análise realizada por Wang *et al.* (2021) é referente à taxa de aeração durante o processo de compostagem. Os resultados mostraram que quanto maior a taxa de aeração, menor é a produção de chorume. Contudo, o excesso de aeração também é indicado, pois leva à grande perda de nitrogênio. A taxa de aeração está diretamente relacionada com a metodologia de compostagem adotada e com a manutenção das condições durante todo o

processo (INÁCIO e MILLER, 2009). Inácio e Miller (2009) recomendam a adoção da técnica de compostagem em leiras estáticas com aeração natural pelos resultados indicarem que essa metodologia é mais adequada para restos de comida, garantindo a taxa de aeração, menor produção de chorume além de ser de mais fácil execução.

Ainda que o solo dê sequência aos processos de biodegradação do chorume e que leva à diminuição das concentrações de possíveis contaminantes, uma relevante análise que deve ser levada em consideração é a capacidade do solo de reter o chorume, isto é, qual a quantidade de chorume que o solo é capaz de absorver e degradar para que o processo de infiltração e degradação sejam eficientes e não comprometam os processos naturais já existentes. Além disso, também é necessário analisar qual seria a distância mínima da composteira, tanto para o nível do lençol freático quanto para o corpo de água superficial, em que o chorume perderia a característica poluidora por conta da ocorrência de infiltração e degradação ao longo do caminho.

Em suma, apesar da possibilidade de ocorrência de contaminantes no chorume, o potencial de contaminação pode ser classificado como baixo, uma vez que os autores afirmam que é possível minimizar e até mesmo eliminar o potencial através de medidas como garantir as condições ideais do processo de compostagem, segregar o resíduo orgânico na fonte e impedir que o chorume encontre diretamente um corpo d'água ao infiltrar no solo, onde os processos de biodecomposição irão continuar ocorrendo diminuindo assim as possíveis concentrações anômalas. Entretanto, ainda é necessário se aprofundar na capacidade do solo em reter o chorume e na distância necessária da composteira para que o corpo d'água e lençol freático não sejam negativamente impactados pelo chorume.

Por fim, ao analisar o potencial de contaminação gerado pelo chorume, deve-se ter em mente que quando o resíduo orgânico não é compostado esse resíduo será destinado a uma unidade inadequada como lixões a céu aberto ou aterros controlados, já que, segundo o SNIS (2020), essas são as principais unidades de destinação final utilizadas no Brasil. Os resíduos dispostos nessas unidades também iniciarão o processo de decomposição, porém sem controle algum em relação a vetores de doenças, odores, liberação de gases e lixiviados tóxicos. À vista disso, é possível afirmar que a compostagem é consideravelmente mais vantajosa que as unidades inadequadas de destinação final, uma vez que, além de reciclar a matéria orgânica, os riscos associados podem ser devidamente controlados e mitigados.

7.2 SITUAÇÕES HIPOTÉTICAS DE INFILTRAÇÃO DE CHORUME NO SOLO

A fim de melhor representar como seria a dinâmica da infiltração de um chorume potencialmente contaminado no solo e a sua capacidade de redução das concentrações contaminante, abaixo são discutidas situações hipotéticas de três tipos de solo diferente. A análise é baseada no coeficiente de permeabilidade descrito por Cruz (1996) que representa a velocidade de infiltração da água de acordo com o tipo de material do meio, ou seja, quanto maior o valor do coeficiente mais rápida será a percolação do líquido.

1- Infiltração em Solo Arenoso

O solo arenoso é um solo considerado muito permeável, dependendo da granulometria dos grãos, o coeficiente de permeabilidade pode variar de 10^{-3} cm/s, para areias finas, a 10^{-2} cm/s, para areias grossas (CRUZ, 1996). Dessa forma, caso a compostagem seja realizada sobre um solo arenoso, a percolação do chorume se dará de forma rápida e menor será o seu grau de retenção e de biodegradação, ou seja, menor também será a redução das concentrações dos potenciais contaminantes. Na hipótese de um lençol freático localizado logo abaixo da camada de solo, o chorume atingirá esse corpo d'água com concentrações um pouco menores que as iniciais. Em uma outra situação em que exista um corpo d'água (rio, córrego, lagoa, etc.) a jusante do sistema de compostagem, a alta velocidade de infiltração impede que ocorra o escoamento superficial do chorume em direção ao corpo d'água.

2- Infiltração em Solo Argiloso

O solo argiloso é um solo considerado pouco permeável com coeficiente de permeabilidade variando de 10^{-8} a 10^{-7} cm/s (CRUZ, 1996). Dessa forma, caso a compostagem seja realizada sobre um solo argiloso, a percolação do chorume se dará de forma lenta e maior será o grau de retenção e de biodegradação, ou seja, maior também será a redução das concentrações dos potenciais contaminantes. Na hipótese de um lençol freático localizado logo abaixo da camada de solo, o chorume atingirá esse corpo d'água com concentrações muito menores que as iniciais. Em uma outra situação em que exista um corpo d'água (rio, córrego, lagoa, etc.) a jusante do sistema de compostagem, apesar da baixa velocidade infiltração, este solo não é impermeável o que minimiza o escoamento superficial do chorume em direção ao corpo d'água.

3- Infiltração em Rocha Maciça

A rocha maciça é considerada praticamente impermeável com coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-9} cm/s (CRUZ, 1996). Dessa forma, caso a compostagem seja realizada sobre uma rocha maciça a percolação do chorume não ocorrerá e não se sucederá a retenção nem a biodegradação, ou seja, as concentrações dos potenciais contaminantes serão as mesmas do chorume inicial. Na hipótese de um lençol freático localizado logo abaixo da rocha maciça o chorume não atingirá esse corpo d'água. Em uma outra situação em que exista um corpo d'água (rio, córrego, lagoa, etc.) a jusante do sistema de compostagem, a ausência de infiltração intensificará o escoamento superficial do chorume em direção ao corpo d'água.

Diante das três situações hipotéticas expostas, o melhor cenário acerca da redução do potencial de contaminação do chorume é a situação nº 2, onde o solo argiloso garante lenta infiltração favorecendo a biodegradação e a retenção de contaminantes no próprio solo, o que impede que os poluentes atinjam corpos d'água.

8. CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica identificou como os principais contaminantes do chorume a matéria orgânica, nutrientes (N, P e K), metais pesados e contaminantes orgânicos. A pesquisa permitiu concluir que apesar da possível ocorrência desses materiais contaminantes no chorume, o potencial de contaminação é baixo desde que sejam garantidas as condições ideais do processo de compostagem (taxa de aeração e temperatura) e que os resíduos orgânicos sejam separados na fonte de outros RSUs. Além disso, o potencial também é reduzido quando o chorume infiltra no solo e não entra em contato direto com corpos d'água, já que o processo de biodecomposição prosseguirá diminuindo cada vez mais as concentrações.

A produção de chorume está diretamente relacionada com a taxa de aeração durante o processo de compostagem, que, por sua vez, está associada ao método de compostagem adotado. Para compostagem em pequena escala é recomendado que se empregue a técnica compostagem em leiras estáticas com aeração natural.

As situações hipotéticas analisadas revelaram que o solo argiloso é o mais indicado para que ocorra infiltração do chorume pois é o que apresentaria melhores processos de retenção e biodegradação dos potenciais contaminante.

Ainda que exista um potencial de contaminação pelo chorume, a alternativa comumente utilizada no Brasil ao processo de compostagem é a destinação dos resíduos em unidades inadequadas como lixões a céu aberto e aterros controlados, o que potencializa as problemáticas relacionadas aos vetores de doenças, odores, liberação de gases e de lixiviados tóxicos. Em contrapartida, a adoção de técnicas de compostagem permite o controle e a mitigação dos potenciais risco associados.

Por fim, apesar da vasta revisão bibliográfica, poucos foram os estudos encontrados com concentrações acerca do chorume proveniente da compostagem de apenas restos de comidas, a maior parte das pesquisas também incluía no material compostado lodo de esgotos, esterco e resíduos orgânicos industriais. Portanto, recomenda-se a realização de novos estudos experimentais que considerem a realidade encontrada nos pequenos sistemas de compostagem realizadas em centros urbanos. Além disso, a capacidade do solo de suportar o chorume e a distância segura do corpo d'água, também devem ser melhor avaliados e levados em consideração ao se implementar um sistema de compostagem, para que o impacto ao meio ambiente seja o menor possível.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE, 2020. - Atlas da Destinação Final de Resíduos 2020. Associação Brasileira De Empresas De Tratamento De Resíduos E Efluentes, 2020. Disponível em: <<https://abetre.org.br/atlas-da-destinacao-final-de-residuos-brasil-2020>>

ABRELPE, 2020. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. Dezembro 2020.

ANJOS, J. L., 2015. Manejo dos Minhocários Domésticos. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015, 14 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN1678-1953; 203). Disponível em: <www.bdpa.cnptia.embrapa.b>

BRASIL, 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos.

BRASIL, 2020. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos

BRASIL, 2021. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Ministério da Saúde. Marcelo Antônio Cartaxo Queiroga Lopes.

BUTTENBENDER, S. E., 2004. Avaliação da Compostagem da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos Provenientes da Coleta Seletiva Realizada no Município de Angelina/SC. 123 f. Dissertação de Mestrado – Programa de pós-graduação em engenharia ambiental, UFSC, Florianópolis, 2004.

CETESB. Decisão de Diretoria Nº 256/2016/E, de 22 de novembro de 2016. Dispõe sobre a aprovação dos “Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2016” e dá outras providências. Processo 95/2012/310 E. Relator: Carlos Roberto dos Santos

CHATTERJEE, N., FLURY, M., HINMAN, C. & COGGER, C. G., 2013. Chemical and Physical Characteristics of Compost Leachates - A Review. Report prepared for the Washington State Department of Transportation. Washington State University

CRUZ, P.T., 1996. 100 Barragens brasileiras. 680 p. 2^a Edição. São Paulo: Editora oficina de textos.

INÁCIO, C. T. & MILLER, P. R. M., 2009. Compostagem: ciência e prática para gestão de resíduos orgânicos. Rio de Janeiro – EMBRAPA.

LIMA, L. C., FIA, R., RIBEIRO, A. G. C., PORTO, F. L. M. M., HASHIZUME, B. M., 2017. Potencial de Contaminação do Solo após processo de compostagem em pátio não impermeabilizado. Revista Engenharia na Agricultura V.25, n.04, p.298-306, 2017. ISSN 2175-6813.

MMA. Diferença entre Lixão e Aterro Sanitário. Disponível em <<https://antigo.mma.gov.br/mmanoforum/item/15708-diferen%C3%A7a-entre-lix%C3%A3o-e-aterro-sanit%C3%A1rio.html>>

MMA, 2019. Programa Nacional Lixão Zero. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. Coordenação Geral de Resíduos. Brasília, DF.

REIS, M. F. P., 2005. Avaliação do Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

ROMERO, C., RAMOS, P., COSTA, C. & MÁRQUEZ, M. C., 2013. Raw and digested municipal waste compost leachate as potential fertilizer: comparison with a commercial fertilizer. *Journal of Cleaner Production* 59 (2013) 73-78.

ROY, D., AZAIS, A., BENKARAACHE, S., DROGUI, P., TYAGI, R. D., 2018. Composting Leachate: characterizations, treatment and feature perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol* (2018) 17:323–349

SILVA, F. C., CHITOLINA, J. C., BALLESTERO, S. D., VOIGTEL, S. D. S. & MELO, J. R. B., 2006. Processos de Produção de Compostos de Lixo e a sua Qualidade como Fertilizante Orgânico. *HOLOS Environment*, v.5 n.2, 2005 – P.121. ISSN 1519-8634.

SNIS, 2020. Diagnóstico do Manejo De Resíduos Sólidos Urbanos 2019. Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – _SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – _2019. Brasília, DF: SNS/MDR, 2020. 244 p.: il.

USEPA, 1994. Composting Yard Trimmings and Municipal Solid Waste. United States Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response (5305). EPA530-R-94-003. May 1994.

WANG, Y., TANG, Y., LI, M., YUAN, Z., 2021. Aeration Rate Improves the Compost Quality of Food Waste and Promotes the Decomposition of Toxic Materials in Leachate by Changing the Bacterial Community. *Bioresource Technology* 340 (2021) 125716. Elsevier.

WORLD BANK GROUP, 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 – Urban Development Series 2018).