

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DE DOIS CENÁRIOS DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS



<https://doi.org/10.56238/arev7n4-194>

Data de submissão: 17/03/2025

Data de publicação: 17/04/2025

Elaine Garrido Vazquez

Doutor (DSc.)

Engenharia civil

Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro

E-mail: elaine@poli.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7262-6753>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/2873246607669444>

Mohammad Najjar

Doutor (DSc.)

Arquiteto

Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro

E-mail: mnajjar@poli.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3407-4142>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9772249202095015>

Alice Magalhães Garcia Souza

Mestrado (MSc.)

Arquiteto

Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro

E-mail: alicemagalhaes.souza@poli.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1853-2569>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/4777159359441415>

RESUMO

Este trabalho realiza um estudo prático na cidade de Paraíba do Sul, comparando dois cenários possíveis para a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). A novidade deste trabalho está em empregar indicadores de custo e sustentabilidade na proposta de gestão de RSU, utilizando a fração orgânica dos resíduos em um processo de compostagem local. Dois cenários são propostos; o primeiro baseia-se no envio de todos os RSU coletados na cidade para o novo aterro privado; e o segundo cenário é um novo modelo proposto neste trabalho, envolvendo o envio de resíduos orgânicos para um pátio de compostagem. O estudo analisa diferentes cenários envolvendo dez bairros do núcleo municipal. Os resultados indicam uma diferença de custo mensal de 19% entre os cenários, sendo a segunda simulação a mais cara. No entanto, esse custo adicional pode ser compensado pela receita das vendas de composto. Os escores dos indicadores de sustentabilidade sugerem que o segundo cenário é o mais favorável ambientalmente, principalmente devido à sua simplicidade tecnológica, ao baixo custo econômico do método de compostagem e à presença de coleta seletiva e aproveitamento de resíduos orgânicos. Destacam-se tais vantagens e a validação econômica do modelo para o contexto de cidades com até 50.000 habitantes, em países em desenvolvimento.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Aterro Sanitário de Sustentabilidade. Compostagem. Gestão de resíduos.

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BNPSW) foi instituída com base na Lei Federal 12.305/2010 [1], que exige a destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos em todos os municípios brasileiros com mais de vinte mil habitantes [2,3]. Um dos maiores desafios para os municípios é coletar, reciclar, tratar e descartar adequadamente o crescente volume de resíduos sólidos [4]. 2018). Cerca de 60% dos municípios brasileiros, especialmente os pequenos, ainda descartam seus resíduos sólidos urbanos de forma inadequada [5]. Sabe-se que municípios menores não possuem investimentos suficientes para uma boa gestão de resíduos sólidos, e muitos deles ainda têm como principal destino final os lixões irregulares a céu aberto [6]. Há, portanto, a necessidade de melhores estratégias de gestão de resíduos sólidos em pequenas regiões urbanas e possíveis políticas de incentivo à redução, reutilização e reciclagem, fomentando práticas sustentáveis de gestão de resíduos [7].

Alguns teóricos da década de 1960 cunharam o termo "metabolismo urbano" para designar fluxos de entrada e saída das cidades, como em um organismo vivo [8]. Nos anos 2000, houve uma segunda geração de estudiosos sobre esse tema, relacionando-o a conceitos como pegada ecológica e circularidade [9–11]. Esta segunda geração enfatiza o papel das cidades no futuro da humanidade, entendendo que viveremos cada vez mais dentro delas e em condições determinadas por elas [9]. No entanto, o modelo atual de cidade - produção, consumo e descarte linear - não deve estar em vigor. Deve-se priorizar o modelo circular, que, diferentemente do modelo linear, não busca recursos nem transfere impactos ambientais para fora dos limites físicos das cidades [11]. Daí nasceu o conceito de "pegada ecológica" das cidades, ou seja, a área física que uma determinada cidade demanda em sua busca por recursos e por espaço para depositar seus resíduos. Virtualmente, as pegadas das cidades existentes já cobrem todo o planeta [9]. Já os conceitos de linearidade e circularidade na cidade referem-se aos insumos de que necessitam (água, energia, alimentos) e aos subprodutos que geram (poluição, resíduos sólidos, esgoto). O planeta Terra é um sistema quase fechado, sendo a energia solar o único recurso externo a este sistema. Assim, os outros recursos que as cidades usam para se desenvolver são os recursos planetários (água, combustíveis fósseis, etc.). Por outro lado, as cidades geram resíduos e poluição, e tais produtos permanecerão no globo, causando impactos às próprias cidades e ao seu entorno - imediatos ou não [9].

Em um ecossistema natural, os resíduos de uma espécie são alimento para outra, de modo que a matéria e a energia podem circular continuamente [10]. Um conceito semelhante se aplica às áreas urbanas, onde a conversão de resíduos em recursos valiosos promove um metabolismo urbano circular. Esse processo ajuda a fechar os ciclos de água, materiais e energia, contribuindo para o desenvolvimento de comunidades sustentáveis. [12,13]. Assim, as potenciais alternativas futuras que precisam de ser exploradas incluem a redução gradual da deposição em aterro através da introdução da compostagem [14,15], digestão anaeróbica e tratamento mecânico-biológico [16]. O tratamento sustentável de resíduos deve ser capaz de recuperar a matéria-prima para conservar os recursos naturais; Isso pode ser alcançado por meio da utilização total de resíduos ou da reciclagem de todos os efluentes gerados no tratamento [17]. Nesse sentido, a compostagem de resíduos orgânicos é uma das técnicas mais vantajosas para a recuperação de resíduos sólidos orgânicos (RSO), principalmente por gerar composto orgânico que pode ser transformado em um excelente composto adubo condicionador orgânico de solo [18].

A compostagem de resíduos orgânicos é um processo controlado de transformação dos resíduos orgânicos em um composto condicionador (fertilizante), com auxílio de microrganismos e monitoramento de temperatura, que pode acontecer de forma aeróbica ou anaeróbia [15]. No Brasil, a maior parcela (50% - 51,4%) dos RSU é composta por matéria orgânica [3,19]; No entanto, a compostagem raramente é utilizada como tecnologia de tratamento, principalmente devido a questões de falta de apoio público, vulnerabilidade institucional, descontinuidades político-administrativas e impactos negativos na vizinhança, como mau cheiro e atração de animais [20,21]. Em 2008, apenas 3,8% dos municípios brasileiros tinham acesso a usinas de compostagem e cerca de 11,6% dos municípios encaminhavam resíduos sólidos urbanos para usinas de reciclagem [7]. Durante as colheitas agrícolas, vários nutrientes são removidos do solo (nitrogênio, fósforo, potássio, ferro, etc.) que não são replantados por fertilizantes sintéticos. Quando o material gerado pelo processo de compostagem é utilizado como fertilizante nas lavouras, esses nutrientes são devolvidos ao solo, apresentando um modelo de reciclagem orgânica, que também promove a aeração e drenagem do solo, como vantagens diretas [22]. Massukado [23], em seu experimento, comparou visualmente a diferença, no cultivo de cenoura e beterraba, com e sem o uso de composto orgânico vs. fertilizantes sintéticos, como mostrado em **Figura 1**.

Figura 1. Teste visual para avaliar o desempenho do crescimento de cenoura e beterraba em uma área sem composto com fertilizante sintético (à esquerda) e uma área com adição de composto orgânico (à direita) [23].



Há pesquisas nacionais que tratam da gestão integrada de resíduos sólidos nos municípios brasileiros, com base em análises ambientais e econômicas [6,24,25]. O termo "integrado" significa não apenas descartar os resíduos em local adequado para sua destinação final ambientalmente correta, mas também considerar tratamentos e alternativas disponíveis para reduzir a quantidade de material que inevitavelmente irá para o aterro. A seguir estão as análises ambientais [26]. Mersoni e de Reichert [27] avaliaram o desempenho ambiental de cinco cenários de gestão de RSU para uma cidade brasileira com 32.000 habitantes, utilizando a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esses cenários integraram processos de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica e incineração, em comparação com um cenário base que considerava apenas aterros sanitários. Todos os cenários que incluíam tratamentos como compostagem tiveram melhor desempenho do que o cenário que incluía apenas a disposição final no aterro. Os autores concluíram, entre outros aspectos, que o retorno do material ao meio ambiente reduziu os potenciais impactos ambientais nos cenários analisados. Para atingir este objetivo, deve ser estabelecido um conjunto de alternativas tecnológicas para a reciclagem dos diferentes tipos de RSU, numa base casuística. Para comparar os benefícios de diferentes sistemas de gestão, sugerem que os stakeholders incluam critérios econômicos e sociais para o local, considerando as premissas do desenvolvimento sustentável. [27].

Marchi [28] desenvolveu um modelo teórico para a Instalação e Gerenciamento de Equipamentos de Disposição de Resíduos Sólidos, visando oferecer uma alternativa mais abrangente do que os modelos técnico-operacionais, que são mais difundidos na literatura. O autor ressaltou a importância de considerar aspectos ambientais e de gestão em estudos desse tipo e concluiu que as prefeituras atuam de forma tecnicamente correta na implantação de aterros sanitários nas cidades, mas acabam se tornando lixões a céu aberto devido à má gestão operacional, falta de pessoal tecnicamente qualificado para operar o equipamento e falta de recursos financeiros. Siqueira e Abreu [29] discutem os desafios da

implementação do processo de compostagem nas cidades brasileiras, principalmente devido à dificuldade em separar os resíduos orgânicos dos inorgânicos e dos rejeitos. Os autores informam que a qualidade final do composto está diretamente relacionada a essa segregação e que deve ser feita na fonte geradora. Além disso, a coleta seletiva também é fundamental para o sucesso do sistema. A pesquisa relata que houve uma ampla disseminação de usinas de triagem e compostagem em todo o país durante a década de 1980, que falharam devido à falta de planejamento técnico adequado. Tal experiência infrutífera parece ser a causa da baixa aceitação da compostagem como solução para RSU entre os gestores públicos. O trabalho também analisa a questão da coleta seletiva nas cidades brasileiras nos últimos 20 anos, informando que, quando existe, é focada apenas nos resíduos inorgânicos (papel, plástico, metal, etc.), e não nos orgânicos (restos de alimentos e podas), pois os primeiros são mais valorizados comercialmente. Diante do exposto, os autores alertam para a ideia de retomar a compostagem nos mesmos moldes da centralização e sem coleta seletiva de orgânicos, como um modelo insustentável que amplia os interesses sociais e ambientais dos municípios [29].

Jacobi e Besen [30] fornecer um panorama brasileiro dos desafios de sustentabilidade para a gestão de RSU, informando que há um crescente investimento do governo federal em infraestrutura, com a construção de aterros sanitários e usinas de triagem e compostagem, entre outros. No entanto, o cenário nacional evidencia a responsabilidade e a necessidade de comprometer a gestão local (prefeituras) com escolhas mais sustentáveis: tanto econômicas (baixo custo), quanto no sentido de tecnologias compatíveis com o contexto municipal em questão. Os autores reforçam a necessidade de reduzir os resíduos nas fontes geradoras e de serem descartados em aterros sanitários, por meio de um plano de resíduos bem elaborado e acordado com a sociedade. Destacam ainda, em consonância com a PNRS, que o aterro não deve ser visto como uma solução final, mas sim como uma alternativa aos resíduos que não são objeto de outros tratamentos prévios; e que a incineração não é uma boa solução, do ponto de vista da sustentabilidade ambiental. Ambos os casos podem contribuir para os padrões de consumo nocivos em vigor [30]. Por fim, comentam que existe um "círculo vicioso", baseado em interesses econômicos em contratos privados, o que dificulta o abandono dos sistemas de aterramento. Determinam, então, que o grande desafio para a gestão de RSU é reverter essa lógica, investindo na redução da geração excessiva de resíduos, coleta seletiva e compostagem – em detrimento da destinação final em aterros sanitários. [30].

O tema do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) tem sido abordado com projetos que reduzem a participação em aterros sanitários na gestão de RSU [31]. Priorizar outros tipos de tratamento de resíduos seria uma diretriz mais inteligente para os países em desenvolvimento, que ainda não foram capazes de implementar massivamente o WL [32]. Os estudos apresentados apontam para a necessidade de reduzir o volume de RSU a ser enviado para aterros sanitários por meio de alternativas que priorizem o retorno da matéria ao meio ambiente, em modelos descentralizados.

Em relação aos critérios de seleção, deve-se lembrar que no Brasil, cerca de 50% dos RSU são orgânicos [33]. Como o WL é um dispositivo caro e com vida útil curta (20 anos em média), a compostagem parece ser uma boa estratégia para reduzir a quantidade de RSU aterrado, principalmente por meio do Método de Compostagem da UFSC, que propõe a compostagem por meio de leiras estáticas de aeração passiva [34]. Além disso, vários estudos apresentam insights sobre os benefícios da reciclagem de resíduos orgânicos por meio da compostagem em aterros sanitários, em termos de extensão da vida útil do aterro, produto de compostagem e mitigação de gases de efeito estufa [34,35]. Existem também inquéritos em que foram realizadas análises econômicas.

Garré et al [36] realizaram um estudo de viabilidade para uma usina de triagem e compostagem no município de Pelotas, RS (320.000 habitantes), estabelecendo resultados que apontam para a viabilidade econômica do modelo, além de vantagens socioambientais. A proposta do estudo é uma planta de grande porte que recebe material heterogêneo - diferente dos estudos direcionados à análise ambiental, apresentados anteriormente. Gunaruwan e Gunasekara [37] realizou uma avaliação comparativa de duas usinas de compostagem no Sri Lanka, tendo concluído a viabilidade técnica e econômica de ambas. O estudo indica que as usinas não são atraentes para investidores privados, mas podem receber subsídios do governo ou melhorar seu desempenho financeiro para se tornarem comercialmente viáveis. Para um dos modelos avaliados, os autores acreditam que, se a usina fosse mais barata e gerasse mais produção de composto, entraria em um limite financeiramente atrativo. Especificamente sobre esse tema, o estudo deixa claro que o alto capital investido é questionável, pois exclui a atratividade financeira dessas usinas. Ele também menciona que algumas administrações locais parecem ter sido bem-sucedidas na implementação e administração de instalações de compostagem com investimentos muito menores. Por fim, indica a possibilidade de utilização de composto em redes de

estabelecimentos que geram grandes quantidades de resíduos orgânicos, como mercados [37].

Wartchow et al [38] realizaram um estudo de caso no município de Ijuí, Rio Grande do Sul - que possui cerca de 83.000 habitantes - comparando 4 cenários para o gerenciamento de resíduos sólidos domiciliares, utilizando o método do Valor Presente Líquido (VPL). Os cenários consideraram diferentes arranjos entre compostagem e WL, ou apenas WL. Para os cenários que incluíam compostagem, os autores escolheram o método que utiliza leiras revolvidas com insuflação de ar, e as soluções variaram entre centrais de triagem e compostagem ou apenas compostagem (sem triagem, com o uso de material segregado na fonte). Os resultados mostraram que o cenário que apresentou o menor VPL para os custos de gestão de RSU foi o que estabeleceu a compostagem de 45% dos resíduos considerando a segregação dos resíduos orgânicos na fonte geradora (domicílios). Além da maior eficiência global, os autores destacaram outras 3 vantagens financeiras nesse cenário: redução de custos com o transporte de resíduos para a WL e também com tratamento de lixiviado na WL (pela redução da quantidade de material enviado para lá), e economia na limpeza da saúde pública urbana. [38].

Finalmente, o estudo de Pandyaswargo e Premakumara [39] que analisou o custo-benefício de plantas em diferentes escalas em países asiáticos em desenvolvimento. Todas as plantas estudadas tiveram algum tipo de apoio financeiro de governos, universidades e agências doadoras. Para a construção da análise, os autores avaliaram quatro cenários, sendo o pior deles a ausência de qualquer apoio financeiro. Ao longo do estudo, são apresentadas informações relevantes. Os autores relatam, por exemplo, que o método de compostagem escolhido influencia diretamente nos custos operacionais da usina: os moinhos de vento tradicionais exigem mais mão de obra, enquanto as tecnologias sofisticadas exigem maior consumo de eletricidade - o que pode significar custos pesados em locais onde a energia custa mais. Destaca-se também a informação de que todas as plantas avaliadas recebem retorno financeiro por meio da venda do composto orgânico, sendo que quanto menor a escala da planta, maior o controle sobre a qualidade final do composto – o que aumenta o valor de mercado do composto. Por fim, foi relatado que o custo do transporte é altamente significativo em usinas de grande porte, o que pode torná-las não lucrativas [39]. Os resultados do estudo mostraram que as usinas de médio e baixo-grande porte (51 e 200 t/dia, respectivamente) obtiveram os melhores desempenhos econômicos, em detrimento das usinas de grande e pequeno porte. No entanto, as duas

usinas de pequeno porte avaliadas mostraram-se financeiramente viáveis, embora ofereçam baixa rentabilidade. Os autores indicam que, nesses casos, o governo pode desempenhar o papel de provedor de custos de investimento [39].

Após a análise dos estudos apresentados, concluiu-se que a compostagem - associada a um meio de disposição final, como um aterro sanitário - parece ser uma boa solução para a gestão de resíduos em pequenas cidades de países em desenvolvimento. Com apenas 2 exceções [27,38], todos os casos de compostagem analisados pelos autores acima são em escala comunitária (instituições de ensino, condomínios) ou em cidades de grande e médio porte, como São Paulo, Pelotas e algumas cidades estrangeiras. Entre as exceções que avaliaram cidades entre 32.000 e 85.000 habitantes), os autores não informaram o método de compostagem utilizado ou se era um método com tecnologia um pouco mais aprimorada (leiras revolvidas com insuflação de ar) [27,38].

A revisão da literatura revelou uma lacuna de pesquisa sobre o potencial de vincular aterros sanitários a uma abordagem de compostagem de baixa tecnologia e implementação descentralizada. Essa integração pode aprimorar as estratégias de gestão de resíduos em cidades brasileiras com população de até 50.000 habitantes. Notavelmente, cerca de 80% dos municípios brasileiros se enquadram nessa faixa populacional. [40], portanto, esse é um contingente relevante a ser considerado como foco das políticas de RSU. Consequentemente, para reduzir os impactos ambientais, levando em consideração as premissas de sustentabilidade e o fechamento do ciclo dos materiais localmente, foi lançada a seguinte hipótese: Analisar a probabilidade da associação da Compostagem Municipal (sob o Método UFSC em implementação descentralizada) com o Aterro Sanitário, como forma de melhorar as estratégias de gestão de resíduos em pequenas cidades brasileiras.

Para avaliar essa hipótese, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso prático na cidade de Paraíba do Sul, na forma de uma avaliação comparativa de dois cenários possíveis para a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), sendo um deles com a proposta de associação da compostagem municipal com aterro, utilizando indicadores de custo econômico e sustentabilidade. A novidade deste trabalho é aplicar o Método UFSC associado ao Aterro Sanitário para cidades de pequeno porte no Brasil. Como o aterro sanitário é um dispositivo caro e de curta duração (20 anos em média), a compostagem pode ser uma estratégia para reduzir a quantidade de RSU de aterro e prolongar sua vida útil. Reconhece-se que, apesar das limitações inerentes à realização de um estudo de caso, os resultados servirão de referência para o Brasil a ser aplicado em cidades brasileiras com até

50.000 habitantes. A pesquisa aqui apresentada foi motivada pela carência de estudos práticos sobre essa temática.

A gestão de resíduos na cidade de Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro, é insatisfatória. A cidade está localizada na região central do estado, a 138 km da capital paulista, com área total de 587,68 km², e população estimada em 2016 de 42.737 pessoas. O município possui uma área predominantemente rural, mas é em seu trecho urbanizado (cerca de 10 km²) que se concentra cerca de 88% da população [40]. A quantidade diária de RSU coletada no município é de 23,5 toneladas por dia, uma vez que é dividida em 0,55 kg por habitante por dia quando relacionada à população do município. A composição gravimétrica dos resíduos na região onde a cidade está localizada é de 53,63% de matéria orgânica, 20,31% de plástico, 16,08% de papel, 2,84% de vidro, 1,74% de metal e 5,40% de outros resíduos [41–43].

Os custos dos serviços de saneamento urbano na cidade de Paraíba do Sul são elevados, com a despesa de gestão de RSU excedendo 13% do valor total anual da despesa municipal [42]. A cidade carece de um Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (MPISWM) [44]; o processo para a execução do estudo ainda está em fase de licitação por meio do Comitê de Meio Ambiente da Paraíba do Sul. O município concluiu apenas o Plano Municipal de Saneamento Básico (PEMB), mas por ter mais de 20 mil habitantes, deve ter o MPISWM independente do PMSP [42]. Após essa breve descrição da cidade do estudo de caso, na próxima seção, será apresentada uma visão geral do método adotado, seguida de resultados, discussão e conclusão.

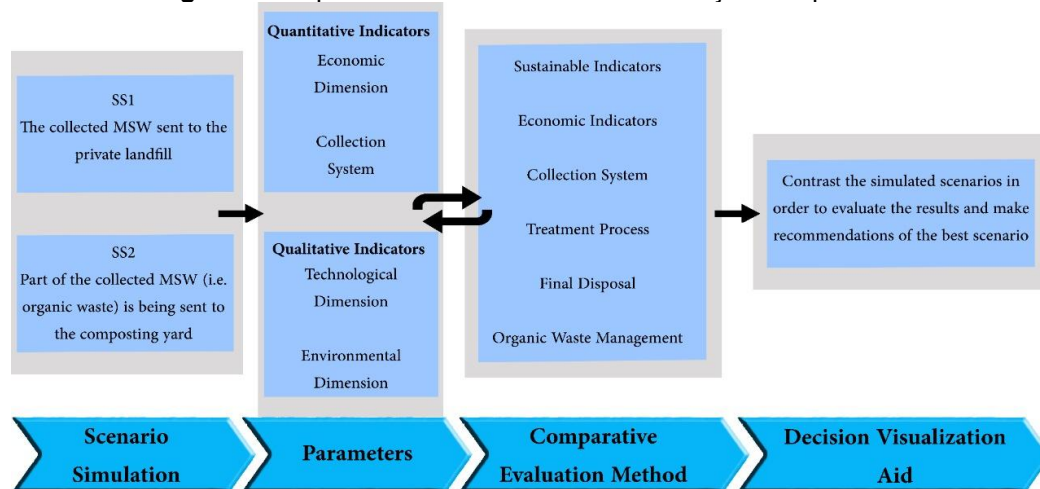
2 MÉTODO DE AVALIAÇÃO COMPARATIVA

A metodologia utilizada neste trabalho foi a pesquisa exploratória quantitativa e qualitativa, avaliando aspectos de custos econômicos e estratégias relacionadas ao desenvolvimento sustentável dos dados coletados. A pesquisa quantitativa baseia-se na estimativa da geração de RSU (total e orgânico de grandes geradores em toneladas por mês), estimativa de custo para coleta (convencional e seletiva a resíduos orgânicos); e estimativa de custos para disposição final e tratamento de resíduos (Aterro Sanitário e Pátio Municipal de Compostagem). A pesquisa qualitativa utiliza indicadores de sustentabilidade, para avaliar os cenários propostos desta pesquisa.

O método de avaliação comparativa será aplicado a dois cenários simulados sob parâmetros quantitativos e qualitativos. Os parâmetros quantitativos referem-se à dimensão

econômica e ao sistema de coleta, e os parâmetros qualitativos referem-se às dimensões tecnológica e ambiental. Por fim, ambos os cenários serão comparados para avaliar os resultados e fazer recomendações para o melhor cenário, como pode ser observado no framework da **Figura 2**.

Figura 2. Enquadramento do método de avaliação comparativa



Assim, o objetivo deste trabalho é validar a hipótese apresentada, por meio da avaliação desses dois cenários simulados de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos para cidades brasileiras com até 50.000 habitantes, utilizando indicadores de custo econômico (para coleta, tratamento e disposição final) e sustentabilidade (dimensões tecnológica e ambiental). Pretende-se ainda propor uma estratégia complementar ao aterro, dada a escala urbana das cidades até aos 50.000 habitantes, e a possibilidade de um tratamento mais sustentável dos RSU, recorrendo à compostagem da sua fração orgânica.

O primeiro cenário avaliado - Cenário Simulado 1 - envolve o envio de todos os RSU coletados para um Aterro Sanitário Privado (PL). O segundo cenário avaliado - Cenário Simulado 2 - envolve o envio dos resíduos orgânicos segregados na fonte para um novo pátio de compostagem, denominado "Pátio Municipal de Compostagem" (MCY). Esses resíduos seriam coletados apenas de grandes geradores e também incluiriam resíduos de poda municipal. Os RSU restantes seriam enviados para PL. É importante destacar dois fatores relacionados ao sucesso da aplicação do processo de compostagem no âmbito municipal, no Cenário 2: o modelo de implantação do MCY e a coleta seletiva de resíduos orgânicos antes segregados na fonte de produção (que são os grandes geradores de resíduos orgânicos, como restaurantes e feiras).

O MCY seguirá o modelo de implantação descentralizada, que é um modelo localizado próximo a fontes geradoras e recebe resíduos de poucos grupos (caracterizados por pátios de compostagem urbanos, institucionais/corporativos, comunitários e/ou domésticos) [21], que provou ser o mais eficiente e duradouro em estudos anteriores [21]. Assim, o terreiro atenderá apenas alguns bairros de perfil intencional. O Método de Compostagem da UFSC foi escolhido para uso no MCY por trabalhar com resíduos previamente segregados coletados de grandes geradores (restaurantes, mercados, feiras, etc. além de resíduos de podas municipais, abundantes no município). Nesse método, as leiras possuem cobertura vegetal seca, o que permite a aeração passiva do material interno e impede o acesso de animais como moscas e ratos, como mostrado em **Figura 3**. Isso significa que o processo é mais barato porque não requer material constante mais eficaz, pois evita impactos na vizinhança relacionados ao cheiro e atração de animais - o responsável para o encerramento da maioria das unidades de compostagem [21].

Figura 3. Compostagem de leiras pelo método UFSC [33]



3 ESTUDO DE CASO: PARAÍBA DO SUL, RJ

A amostra utilizada nesta pesquisa foi composta por dez distritos da sede municipal de Paraíba do Sul, escolhidos por estarem localizados no núcleo central do município com alta densidade populacional e por possuírem grande concentração de geradores de resíduos orgânicos. Trata-se de uma amostra representativa do universo de estudo, uma vez que a maioria dos habitantes estão presentes na sede municipal e, portanto, é onde é gerada a maior parcela de RSU [45]. A seguir, serão apresentados os instrumentos, fontes e parâmetros do método de pesquisa para cada um dos indicadores quantitativos e qualitativos, propostos na avaliação dos cenários simulados neste estudo de caso.

3.1 INDICADORES QUANTITATIVOS

3.1.1 Indicador de custo econômico - estimativas de geração de resíduos sólidos urbanos

Foram feitas duas estimativas de geração de resíduos: RSU total (heterogêneo) e RSO de grandes geradores. Para definir tais quantidades, foi realizado um levantamento da área e da população do bairro proposto de corte. Para definir a área e a população desse trecho, foram utilizados dados do Plano Diretor de Desenvolvimento Territorial da Paraíba do Sul. A quantidade total de RSU coletada neste universo foi estimada, em toneladas por dia, com base na quantidade de 0,55kg/hab/dia [41–43].

Para identificar e selecionar os grandes geradores de RSO, foi feito um levantamento no cadastro municipal de empresas e o levantamento das áreas de tais estabelecimentos, em m² - informações que foram utilizadas para estimar a quantidade de resíduos gerados. De acordo com [46], os principais geradores de OSW são restaurantes, lanchonetes, lojas de sucos, frutas e verduras, mercados, produtores de alimentos para delivery e hotéis.

A quantidade de RSO gerada nos estabelecimentos selecionados foi derivada da COMLURB [47], que indica as seguintes estimativas: 0,70 litros/dia/m² para lojas, hotéis e pousadas e 1,00 litro/dia/m² para restaurantes, lanchonetes e similares. As quantidades encontradas em litros referem-se ao resíduo heterogêneo e foram convertidas de volume para peso, utilizando-se o índice PROSAB [48], que define a densidade média de 300 kg/m³ para os RSU recém-coletados. Para definir as quantidades compostáveis, as quantidades heterogêneas foram multiplicadas por 0,50, uma vez que a fração orgânica é cerca de metade do total de resíduos, em peso [33].

3.1.2 Indicador de custo econômico - estimativas de custos de cobrança

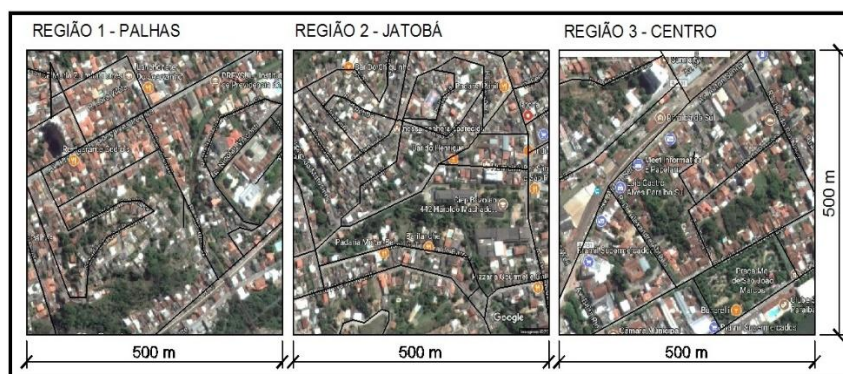
Foram feitas duas estimativas de custos de coleta: custo da coleta convencional e custo da coleta seletiva de orgânicos de grandes geradores. Tais estimativas são compostas por: consumo de combustível do veículo e salários dos funcionários. Produzir mapas com as rotas de coleta [46], o sistema digital Google Maps, com suas funcionalidades de Rotas e Marcadores, foi usado para identificar as rotas de viagem relevantes.

Para o consumo médio de combustível dos veículos, foram definidos os veículos de coleta e as distâncias a serem percorridas em ambos os tipos de coleta: para a coleta convencional, o caminhão compactador com capacidade de 19m³ - correspondente a 5,7 t de resíduos [48] enquanto para a coleta seletiva, foi simulado um caminhão com carroceria

aberta modelo Ford F-4000 [45]. Foram definidos dois tipos de distâncias (km/mês) para cada tipo de coleta: distância D1, referente à logística dos resíduos já coletados até sua destinação final; e distância D2 - referente à coleta domiciliar. Na coleta convencional, D1 é a distância entre o centro urbano da Paraíba do Sul e o Aterro Privado Três Rios (TRPL); na coleta seletiva, D1 é a distância entre o centro urbano e o MCY. A distância D2 foi a mesma em ambas as coleções: para defini-la, foram mapeadas três regiões do recorte do bairro proposto e a quilometragem de suas ruas foi medida por meio do software AutoCAD.

Regiões com diferentes padrões de ruas foram escolhidas para atingir uma média representativa do perfil espacial. Cada região possui 0,25 km², sendo que a média das 3 regiões é de 2,9 km de ruas - portanto, por meio de uma regra de 3, 1 km² equivale a 11,6 km de ruas (**Figura 4**). Das 3 regiões, as demais foram estimadas pela área total de cada bairro, conforme tabela 1. Assim, estima-se um D2 de 113 km de ruas a serem percorridas por caminhões de coleta convencional e seletiva.

Figura 4. Mapas das 3 regiões escolhidas no trecho de bairro proposto, para definir a quilometragem das rotas de coleta



Para o cálculo do consumo de combustível, foi utilizada a estimativa de Lino (2009): 0,433 L/km. O óleo diesel utilizado nos caminhões custava cerca de R\$ 3.254/L em novembro de 2017, na região da Paraíba do Sul – valor definido a partir da média entre os valores das cidades: Rio de Janeiro, Sapucaia e Teresópolis, disponíveis na Agência Nacional do Petróleo [49].

Os salários dos cobradores e motoristas foram estimados por meio de [50]: R\$ 478,73 e R\$ 500,00, respectivamente – e ajustados de acordo com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC) [51]. O salário mínimo vigente em 2017 (R\$ 937,00) foi utilizado para valores ajustados abaixo deste.

No Cenário 1, a coleta convencional é simulada uma vez ao dia, exceto aos domingos (média de 28 dias/mês), realizada por quatro funcionários em cada caminhão.

No Cenário 2, além da coleta convencional (nos mesmos moldes descritos para o Cenário 1), é simulada a coleta orgânica seletiva, também em média 28 dias/mês, mas por dois funcionários em cada caminhão. Neste cenário, simula-se o uso de tambores plásticos de 50 L para simular OSW em fontes geradoras. Bombas cheias serão oferecidas para coleta e esvaziadas no MCY. No momento da coleta, serão entregues latas vazias aos geradores, configurando um ciclo de recipientes que não são descartáveis e serão adquiridos pelos geradores – não compreendendo custos para a gestão dos RSU municipais.

Ressalta-se que o modelo proposto para o Cenário 2 contempla a segregação dos resíduos orgânicos dos demais, a ser realizada pelos grandes geradores antes de oferecê-los para coleta – não compondo, assim, nenhum custo para a administração do sistema (prefeitura).

3.1.3 Indicador de custo econômico - estimativas de custo de disposição final e tratamento de resíduos

Os custos de disposição final e tratamento foram estimados com base em três definições: Custos de disposição final no TRPL; Custos para implementação do MCY e operação mensal; e Receita mensal da comercialização do composto.

Para apurar os custos da disposição final no TRPL, foi utilizado o valor de R\$ 54,25/t, conforme descrito no Plano Nacional de Resíduos Sólidos [44], foi corrigido, segundo o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), em novembro de 2017 [51]. Para o Cenário 1, todos os RSU gerados foram considerados. Para o Cenário 2, no cálculo mensal da geração de resíduos heterogêneos, foi subtraída a geração de orgânicos a partir dos grandes geradores.

Para determinar os custos de implantação do MCY, primeiramente foi definido o Método UFSC sob o Modelo de Implantação/Gestão Descentralizada, de acordo com sua adequação ao estudo de caso proposto. Os custos de implementação do MCY foram estimados globalmente, em reais (R\$), por meio de manuais e estudos de caso semelhantes [46], e corrigido de acordo com o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) [51].

Os custos operacionais mensais da MCY foram estimados de forma unitária, levando em consideração os salários dos funcionários e os custos operacionais fixos. MMA [46] indica a necessidade de apenas um profissional - Revirador de Leira -, de acordo com o parâmetro demográfico mais próximo deste estudo. Tal referência foi utilizada, considerando a necessidade de mais dois funcionários: um Auxiliar Administrativo e um Auxiliar de Pátio. Os

salários dos funcionários descritos no documento - R\$ 1.041,01, R\$ 1.163,71 e R\$ 612,00, respectivamente [46] - foram reajustados de acordo com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC) [51]- Novembro de 2017 para os custos fixos de operação, foram estimados os valores de consumo de água e energia do MCY, de acordo com o CAOPMA [52] - a saber: R\$ 150,00 por mês, referente à soma de ambos. Para o ajuste da inflação, foi utilizado o Índice Geral de Preços do Mercado (IGPM) em novembro de 2017.

Determinando a receita da comercialização do composto, a quantidade gerada foi primeiramente estimada. De acordo com o MMA [46], "para cada quilo de resíduo entregue à unidade, [produz] meio quilo de composto". Assim, a estimativa calculada de RSO recebida no MCY foi multiplicada por 0,5. De acordo com uma pesquisa no mercado local, o preço médio de 1 kg de composto é de R\$ 15,00. Optou-se por simular um preço abaixo do valor de mercado, para promover o fechamento local do ciclo de RSO, vendendo para pequenos agricultores da região.

3.2 INDICADORES QUALITATIVOS

Este artigo apresenta uma análise qualitativa dos cenários propostos aplicados a indicadores de sustentabilidade, principalmente relacionados à circularidade dos materiais, à geração de emprego e renda, ao aumento da vida útil do aterro sanitário e à priorização de soluções locais com base na pesquisa anterior de Santiago et al. [53]. Tradicionalmente, seis dimensões da sustentabilidade são frequentemente avaliadas, a saber: política; Tecnologia; econômico e financeiro; ambiental e ecológico; dimensão conhecimento (educação ambiental e mobilização social); e a dimensão da inclusão social [53]. A aplicabilidade de indicadores das dimensões Política e Econômica seria de difícil aplicação, pois a avaliação de dois cenários simulados para a gestão de resíduos foram desenvolvidos no município e não para o país.

Os indicadores propostos nas dimensões Conhecimento e Inclusão Social não se aplicam a esta pesquisa, pois se relacionam a especificidades dentro da temática RSU que não estão sendo abordadas neste estudo - como aspectos relacionados à educação ambiental e inclusão de catadores de materiais recicláveis. Assim, a presente pesquisa adota indicadores específicos das dimensões Tecnológica e Ambiental/Ecológica, conforme apresentado na **Tabela 1** e na **Tabela 2**; na dimensão tecnológica, são utilizados todos os indicadores como I2a, I2b, I2c e I2d. Na dimensão ambiental e ecológica, serão empregados apenas os indicadores relacionados aos resíduos sólidos descritos a seguir: I4d, I4e, I4f, I4g,

14h e 14j.

Tabela 1. Padrão Matriz de Indicadores de Sustentabilidade para RSU – Dimensão Tecnológica [45,53,54]

Dimensão	Pergunta-chave	Indicador	Descrição	Pontuação
Tecnológico	Isso observa os princípios tecnologia apropriada?	(I2a) Emprega mão de obra local	Todas as fases da gestão de resíduos sólidos	5
			Coleta e administração	3
			Apenas coleta	1
		(I2b) Manutenção do equipamento feita localmente	Todas as fases da gestão de resíduos sólidos	5
			Apenas transporte	2
			Manutenção externa	1
		(I2c) Tecnologia de reutilização com baixo consumo de energia, patentes não regatas e royalties; fácil manuseio; emprega mão de obra local	Compreende todos os itens	5
			Apenas baixo consumo de energia e royalties e patentes não relacionados a reboques	3
			Não comparecimento	0
		(I2d) Veículo coletor específico apropriado em termos de capacidade, tamanho para as necessidades de geração local	Sim (apenas para esta função)	5
			Sim (também usado em outras funções municipais)	2
			Não comparecimento	0
		SUBTOTAL MÁXIMO		20

Tabela 2. Padrão de Matriz de indicadores de sustentabilidade para RSU – Dimensão Ambiental/Ecológica [45,53]

Dimensão	Pergunta-chave	Indicador	Descrição	Pontuação
Ambiental / Ecológico	Impacto ambiental mínimo?	(E4a) Eficiência de coleta	91 a 100%	5
			31 a 90%	2
			< 30%	1
		(I4b) Satisfação da população com a coleta pública (periodicidade/frequência/horário)	> 70%	5
			30 a 70%	3
			< 30%	1
		(I4c) Existência de latas públicas	Em toda a área urbana, em locais onde as pessoas se deslocam	5
			Apenas no centro do núcleo municipal	2
			Não tem latas	0
		(I4d) Existência de coleta seletiva no município	Sim	5
			Na fase de implantação	3
			Não existe	0
		(I4e) Cobertura da coleta seletiva no município	A cidade inteira	5
			Toda a área urbana da cidade	4

			Exclusivamente em alguns bairros da área urbana	1
		(I4f) Existência de locais para a oferta voluntária de resíduos segregados	Atende a mais de 50% da população	5
			Atende menos de 50% da população	3
			Não tem	0
		(I4g) Taxa de recuperação dos materiais recicláveis	Acima de 10,1%	5
			Entre 5,1 e 10%	3
			Até 5%	1
		(E4h) Valorização de resíduos orgânicos	Acima de 30%	5
			Entre 5,1 e 30%	3
			Até 5%	1
		(I4i) Geração de resíduos sólidos urbanos <i>per capita</i> (kg/pessoa/ano)	< 307	5
			Entre 307 e 376	3
			> 376	1
		(I4j) Aterro Licenciado / Despejo Controlado Licenciado	Sim	5
			No processo de licenciamento	2
			Não licenciado ou lixão	0
		(I4l) Existência de aterro para resíduos inertes (resíduos de construção e demolição)	Sim, com reutilização	5
			Sim, apenas para descarte	2
			Não tem	0
		(I4m) Número de locais de lixo clandestino / extensão total das estradas em km	Nenhum	5
			0,1 a 0,4	3
			≥ 0,4	1
		(I4n) Existe recuperação de áreas degradadas por resíduos?	Completamente	5
			Parcialmente	3
			Não comparecimento	0
		SUBTOTAL MÁXIMO		65

4 RESULTADOS

Após a exposição do método aplicado na cidade do estudo de caso, serão apresentados os resultados para testar a hipótese deste trabalho.

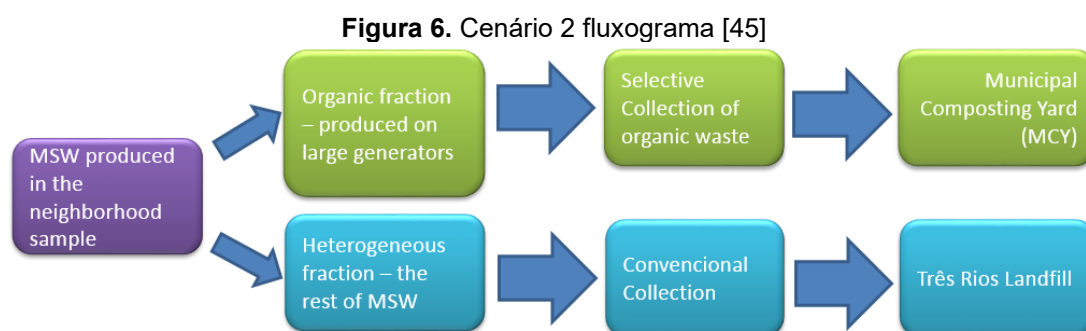
4.1 APRESENTAÇÃO DE CENÁRIOS

O cenário 1 contempla o envio de todos os RSU para o TRPL. **A Figura 5** demonstra o fluxograma para este cenário.

Figura 5. Cenário 1 Fluxograma [45]



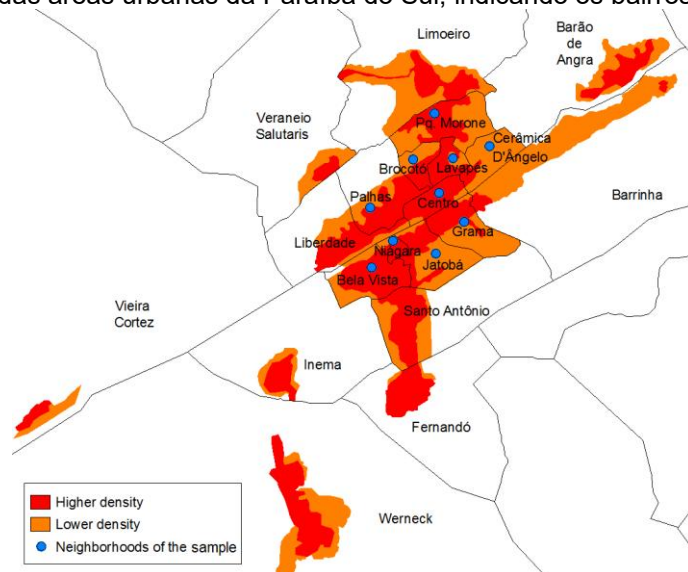
O cenário 2 é um modelo em que a fração orgânica de grandes geradores seria enviada para um pátio de compostagem municipal, e os demais RSU continuariam sendo enviados para o TRPL, conforme mostrado na **Figura 6**. RSU inorgânico e perigos seriam encaminhados para o aterro de Três Rios, pois não há capacidade técnica nem recursos financeiros para tratar localmente ou dar uma destinação final ambientalmente adequada para esses tipos de resíduos.



4.1.1 Indicador de Custo Econômico - estimativas de geração de resíduos sólidos urbanos

Os dez bairros contemplados no recorte espacial proposto compõem o tecido urbano contínuo do município. São eles: "Bela Vista", "Brocotó", "Centro", "Cerâmica D'Angelo", "Grama", "Jatobá", "Lavapés", "Niágara", "Palhas" e "Parque Morone", conforme apresentado em **Figura 7**. Os bairros "Limoeiro", "Liberdade", "Santo Antônio" e 'Fernandó', apesar de estarem no mesmo ponto urbano do mapa, possuem características morfológicas ou limites que os diferenciam dos demais, como a presença de rodovia ou o relevo acentuado [55].

Figura 7. Mapa das áreas urbanas da Paraíba do Sul, indicando os bairros mais densos [45]



Conforme descrito no Plano Diretor de Desenvolvimento Territorial da Paraíba do Sul, 88% da população municipal da Paraíba do Sul está concentrada em áreas urbanas densamente povoadas [41–43]. Sendo a população total (100%) do município de 42.737 habitantes, a O percentual de 88% resulta em 37.608 habitantes. A partir desses dados demográficos, e da soma de todas as áreas, 37.608 pessoas vivem em 9,68 km².

Para o corte-Fora dos bairros, a soma das áreas ocupadas é de 4,61 km². A partir deste e dos dados anteriores (37.608 pessoas vivem em 9,68 km²), foi utilizada uma regra de três para definir a população dos bairros recortados, obtendo-se a população de 17.910 habitantes nos bairros recortados. Assim, a área estudada neste estudo de caso possui 4,61 km², e sua respectiva população é de 17.910 habitantes [45].

A partir dos dados de 0,55 kg/hab/dia, e a população total da área espacial (17.910 hab.). Há uma produção de 9,85 t/dia de RSU nos bairros analisados, que passa a ser de 305,4 t/mês [41–43]. É importante lembrar que, no Cenário 1, toda essa produção será exibida no TRPL. No Cenário 2, esse valor será menor, ao subtrair a fração orgânica dos grandes geradores.

O documento obtido do Cadastro Municipal de Empresas, em março de 2017, organiza as empresas por categorias de atividades e disponibiliza seus endereços. 12 categorias/atividades foram selecionadas como principais geradoras neste estudo de caso. Da soma dos estabelecimentos, tem-se que o total de grandes geradores orgânicos de RS contemplados nesta pesquisa é de 95 estabelecimentos.

Estimando a produção de resíduos orgânicos a serem encaminhados ao MCY, foi realizado o procedimento descrito em Método, que relaciona a geração de resíduos com as áreas e funções dos estabelecimentos - de acordo com a COMLURB [47]. **Tabela 3** mostra a soma das áreas dos estabelecimentos por categoria, seguida da produção total de resíduos na categoria e, por fim, a geração total de RSU em todas as categorias.

Tabela 3. Áreas e produção total de resíduos heterogêneos de grandes estabelecimentos geradores na Paraíba do Sul

Categoria do imóvel	Área (m²)	Produção de RSU (litros/dia)
Com. Varejo. De produtos hortícolas	734	513,80
Com. Varejo. Verduras	86	60,20
Com. Varejo. Merc. Em geral, com predominância. Alimento	668	467,60
Prov. Alimentos preparados para empresas	72	72
Hotel	4166	2916,20
Lanchonete	1686	1686
Snack-bares, casas de chá, sumos e similares	2323	2323
Mini mercado	342	239,4
Pensão alimentícia	262	262
Pizzaria	401	401
Restaurantes e similares	2346	2346
Supermercado	1947	1362
Total de RSU heterogêneos de todas as categorias (litros/dia)		12650,10
Metros cúbicos em quilogramas (densidade MSW = 300 kg / m³)		3.795 kg

A fração orgânica foi calculada de acordo com o procedimento descrito em Método, chegando a uma produção estimada de 1,9 t/dia de RSO nos grandes geradores, que converte em 58,9 t/mês - quantidade de RSO que será enviada ao MCY, no Cenário 2. A quantidade de resíduos heterogêneos a serem enviados para TRPL no Cenário 2 é de 7,95 t/dia, que se converte em 246,5 t/mês.

4.1.2 Indicador de custos - estimativas de custos de cobrança

A **Tabela 4** mostra o número de caminhões compactadores para atender a estimativa da geração total de RSU no recorte para coleta nos bairros escolhidos. Também apresenta as distâncias D1 e D2, custos de combustível e custos de salários de funcionários. O número de funcionários para coleta convencional de RSU foi definido da seguinte forma: 3 catadores e 1 motorista por caminhão, totalizando 6 catadores e 2 motoristas.

Tabela 4. Custos estimados da recolha convencional de RSU

Total de RSU	9,85t/dia
Capacidade do caminhão compactador	19m ³ (5,7t)
Número de caminhões compactadores	2
D1 (km / mês)	17,8 km por viagem x 4 71,2 km / dia no total x 28 dias 1.994 km / mês
D2 (km / mês)	113 km / dia por 28 dias D2 = 3.164 km/mês
D1 + D2	5.158 km / mês
Custo mensal de combustível	consumo médio de 2.233 L/mês valor do diesel por litro (R\$ 3.254) valor aproximado R\$ 7.500,00/mês
Custo salarial mensal (8 funcionários)	R\$ 7.532,46/mês
Custo total	R\$ 15.032,46/mês

A **Tabela 5** mostra o número de caminhões necessários para a coleta seletiva de orgânicos nos 95 grandes estabelecimentos. Também mostra as distâncias D1 e D2, custos de combustível e custos de salários de funcionários. O local escolhido para a instalação do MCY é em uma estrada a uma distância adequada do núcleo urbano. A distância do MCY aos bairros recortados (D1) é de cerca de 3 km. O número de funcionários para coleta convencional de RSU foi definido da seguinte forma: 1 coletor e 1 motorista por caminhão, totalizando 2 coletores e 2 motoristas.

Tabela 5. Estimativa dos custos da recolha seletiva de RSU

MSW	1,9 t / dia
A capacidade do caminhão modelo Ford F-4000 com carroceria aberta mede 6,5 m x 2,5 m	96 tambores de 50L por viagem Capacidade de 1,44 t de resíduos por viagem
Número de caminhões compactadores	2
D1 (km / mês)	3 km por viagem x 4 12 km / dia no total x 28 dias 336 km / mês
D2 (km / mês)	113 km / dia por 28 dias D2 = 3.164 km/mês
D1 + D2	3.500 km / mês
Custo mensal de combustível	consumo médio de 1.515 L/mês Valor do diesel por litro (R\$ 3.254) valor aproximado R\$ 5.000,00/mês
Custo salarial mensal (4 funcionários)	R\$ 3.784,46/mês
Custo total	8.784,46 / mês

4.1.3 Indicador de custos - estimativas de custos de eliminação final e tratamento de resíduos

A **Tabela 6** apresenta os custos para a disposição final dos resíduos no aterro, no Cenário 1 e no Cenário 2. O valor corrigido em novembro de 2017 foi de R\$ 92,15/t.

Tabela 6. Custo de disposição final em TRPL - Cenário 1e Cenário 2

Custo do cenário 1		Custo do cenário 2	
Quantidade total de RSU	305,4 t/mês	Quantidade total de RSU	246,5 t/mês
Valor de RSU/t	92,15/t	Valor de RSU/t	92,15/t
Valor total aproximado	R\$ 28.500,00 / mês	Valor total aproximado	R\$ 23.000,00 / mês

Para o presente estudo de caso, utilizou-se o valor de Jardim (1995), corrigido em novembro de 2017: R\$ 85.340,00, aproximando-se do valor de R\$ 90.000,00. **A Tabela 7** apresenta os custos operacionais do MCY - valores de referência corrigidos em novembro de 2017.

Tabela 7. Custos estimados para operar o MCY. Adaptado do MMA [46] e CAOPMA [52]

Itens		Valor de referência (R\$)	Valor corrigido (R\$)
Contas de água e energia		150,00	222,53
FUNC.	Virador de moinho de vento	1.041,01	1.619,68
	Assistente administrativo	1.163,71	1.810,59
	Assistente de Pátio	612,00	952,20
Total corrigido (aproximado)		4.605,00 (R\$ 5.000,00)	

Com base na quantidade estimada de RSO recebida no MCY (58,9 t/mês), multiplicada por 0,5, há uma produção estimada de 29,4 t/mês de composto. O valor de R\$ 2,00 foi estipulado para a comercialização do saco de 1 kg de composto produzido no MCY – valor bem abaixo do arrecadado no mercado local (R\$ 15,00/kg). Então, há uma receita mensal estimada de R\$ 58.800,00, que pode ser arredondada para R\$ 55.000,00/mês. Por fim, a **Tabela 8** apresenta um resumo de todos os indicadores de custo.

Tabela 8. Resumo dos indicadores de custos

Resumo dos indicadores de custos			
	descrição	Quant. / Ordem da Grandeza	unidade
1	Quantidade total estimada de RSU	305,4	t/mês
	Estimativa da quantidade da fração orgânica GG	58,9	t/mês
	Quantidade estimada RSU (-) fração orgânica GG	246,5	t/mês
2	Custo de coleta convencional	15.032,46 (15.500,00)	R\$/mês
	Grande custo de coleta seletiva orgânica ger.	8.784,46 (9.000,00)	R\$/mês
3	Custo final de disposição AS para o Cenário 21 (todos RSU)	28.142,61 (28.500,00)	R\$/mês
	Custo final de eliminação AS para o cenário 2 (RSU, exceto GG orgânico)	22.714,97 (23.000,00)	R\$/mês
	Custo de implantação do MCY	85.340,00 (90.000,00)	R\$

Custo de operação mensal do MCY	4.605 (5.000,00)	R\$/mês
Receita estimada da comercialização do composto	58.800,00 (55.000,00)	R\$/mês

4.2 INDICADORES QUALITATIVOS – TECNOLOGIA MATRICIAL

Para o indicador I2a, "Utiliza mão de obra local", ambos os cenários pontuaram 3 pontos, referentes às fases de coleta e administração. Como as outras fases do manejo de RSU podem exigir mão de obra especializada - o que nem sempre é encontrado na cidade - optou-se por marcar apenas essas duas. Para a gestão técnica da MCY, por exemplo, é importante contar com um profissional ou consultor especializado em solo e técnicas de compostagem. Também o envio de resíduos para um WL fora do município, por si só, já caracteriza agentes externos. Ressalta-se que a gestão da coleta de lixo atualmente é realizada por uma empresa terceirizada, mas em ambos os cenários, simula-se que a cidade assume esse serviço.

O segundo indicador, I2b, "Manutenção de equipamentos realizada localmente", obteve pontuação 5 para ambas as SS, referente a todas as fases de gestão, uma vez que os equipamentos utilizados são simples e sua manutenção é facilmente encontrada na cidade.

Indicador I2c, "Tecnologia de reutilização energeticamente eficiente, não vinculada ao pagamento de patentes e royalties; fácil manuseio; emprega mão de obra local", não marcou nenhum ponto para o Cenário 1, pois não prevê nenhuma tecnologia de reutilização. Para o Cenário 2, obteve 5 pontos, pois o modelo de utilização proposto na simulação (Método de Compostagem da UFSC) contempla todos os itens descritos.

Por fim, o indicador I2d, "Veículo de coleta de capacidade específica e tamanho adequado para as necessidades de geração local", obteve 5 pontos para o Cenário 1, pois o caminhão de coleta convencional (compactador) é de uso único. Gestão de RSU. Para o Cenário 2, o indicador obteve 2 pontos, pois a caminhonete orgânica (carroceria aberta) poderia ser utilizada para outras funções municipais. Assim, o escore total da Matriz Tecnológica foi de 13 e 15, respectivamente para o Cenário 1 e o Cenário 2.

4.2.1 Matriz ambiental e ecológica

Os indicadores I4a, I4b, I4c, I4i, I4l, I4m e I4n não se aplicam aos cenários simulados neste trabalho, a saber: "Eficiência de coleta"; "Satisfação da população quanto à arrecadação"; "Existência de lixões públicos"; "Geração de RSU per capita"; "Existência de

aterro para resíduos inertes"; "Número de pontos de desperdício clandestinos"; e "Há a recuperação de áreas degradadas por resíduos", respectivamente.

Para o indicador I4d, "Existência de coleta seletiva no município", o Cenário 1 não obteve pontuação, pois esse cenário não prevê essa solução. O cenário 2 obteve 5 pontos, referente à existência plena da coleta seletiva.

O indicador I4e, "Abrangência da coleta seletiva no município", também não pontuou para o Cenário 1, pois não se aplica. Em relação ao Cenário 2, obteve 1 ponto, uma vez que a coleta de orgânicos atende apenas alguns bairros da área urbana.

Para os indicadores I4f, "Existência de pontos de destinação voluntária de resíduos segregados", e I4g, "Índice de recuperação de materiais recicláveis", nenhum dos cenários pontuou, pois essas soluções não foram previstas em nenhuma das simulações.

No indicador I4h, "Recuperação de resíduos orgânicos", não houve pontuação para o Cenário 1. Para o Cenário 2 foram 3 pontos, referentes à alternativa "Entre 5,1% e 30%" de recuperação. Estima-se que o total de resíduos orgânicos gerados no município seja de 11,7 t/dia, uma vez que o total global (RSU heterogêneo) é de 23,5 t/dia [42] e a fração orgânica representa em média 50% do total [33]. Assim, a quantidade de resíduos orgânicos definida no estudo de caso a ser encaminhada para compostagem MCY (1,9 t/dia - referente aos grandes geradores dos bairros cortados) representa 16,2% do total de 11,7 t/dia.

Por fim, o indicador I4j, "Aterro sanitário e controlado licenciado", obteve 5 pontos em ambos os cenários, pois ambas as simulações preveem o uso do TRPL.

Assim, o escore total da Matriz Ambiental/Ecológica foi de 5 e 14, respectivamente para o Cenário 1 e Cenário 2. **A Tabela 9** abaixo resume os indicadores de sustentabilidade para cada cenário.

Tabela 9. Resumo dos Indicadores de Sustentabilidade

RESUMO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE				
OFUSCAR	Item	Descrição	Cenário de pontuação 1	Cenário de pontuação 2
DIMEN SÃO AMBI ENTAL / ECON	I2a	Mão de obra local	3	3
	I2b	Manutenção de equipamentos feitos localmente	5	5
	I2c	Tecnologia de reutilização com baixo consumo de energia, royalties não relacionados a reboques; fácil manuseio; emprega mão de obra local	0	5
	I2d	Veículo de recolha específico e adequado	5	2
DIMEN SÃO AMBI ENTAL / ECON	I4d	Existência de coleta seletiva no município	0	5
	I4e	Cobertura da coleta seletiva no município	-	1

	I4f	Existência de vagas para oferta voluntária	0	0
	I4g	Índice da taxa de recuperação de materiais recicláveis	-	-
	I4h	Índice da taxa de valorização dos resíduos orgânicos	-	3
	I4j	Aterro Licenciado / Despejo Controlado Licenciado	5	5
		TOTAIS	18	29

5 DISCUSSÃO

A partir dos dados obtidos, foi avaliado o custo mensal do PMPS [55] para a coleta e destinação final de seus resíduos é de aproximadamente R\$ 44.000,00 para o Cenário 1; e aproximadamente R\$ 52.500,00 para o Cenário 2. **Tabela 10** Abaixo mostra uma comparação de valores reais e percentuais para os cenários simulados 1 e 2.

Tabela 10. Comparação, em valores absolutos e percentuais, entre os indicadores de custo econômico para o Cenário 1 e o Cenário 2

Indicadores de Custos Econômicos	Valores do Cenário 1 (R\$)	Valores do Cenário 2 (R\$)	Observações percentuais
Coleção(ões)	15.500,00	24.500,00	<i>Cenário 2: 58% mais caro que o Cenário 1</i>
Disposição Final no Aterro Sanitário - RS heterogêneo	28.500,00	23.000,00	<i>Cenário 2 19% mais barato que o Cenário 1</i>
Tratamento MCY - RS Organic GG	--	5.000,00	<i>Cenário 2 apenas</i>
TOTAIS	44.000,00	52.500,00	<i>Cenário 2 19% mais caro que o Cenário 1</i>

A diferença entre os custos mensais entre o Cenário 1 e o Cenário 2 foi de apenas R\$ 8.500,00, ou cerca de 19%, sendo o Cenário 2 o mais caro. Esse valor é considerado baixo no âmbito da gestão municipal de RSU, no entanto a Paraíba do Sul é um município pequeno, que possui poucos recursos. Assim, tal investimento poderia ser necessário em um programa de promoção de iniciativas de desenvolvimento sustentável, ou em projetos de MDL - uma vez que o Cenário 2 inclui o sistema de compostagem.

Ressalta-se que o MCY proposto neste estudo de caso custaria aproximadamente R\$ 90.000,00 para ser implantado na Paraíba do Sul. Tal custo é apenas cerca de um quinto do valor estimado para o remanejamento anual do ICMS Verde na cidade: R\$ 449.522,91 [42]. Esse recurso pode ser exigido pelo PMPS [55] no primeiro ano da destinação dos resíduos da cidade para a TRPL.

Assim, o MCY poderia ser implantado e entrar em operação no ano seguinte, gerando uma economia de aproximadamente R\$ 5.500,00/mês na destinação de resíduos no TRPL – valor que poderia ser utilizado para financiar a operação mensal do próprio MCY (estimado em R\$ 5.000,00 mensais).

No Cenário 2, a venda de composto poderia gerar uma receita média mensal de R\$ 55.000,00, valor que cobre integralmente os custos de gestão de resíduos no Cenário 2 (R\$ 52.500,00). Lembrando que esse total de R\$ 52.500,00 não considera custos significativos, relacionados à depreciação de equipamentos, impostos, encargos, etc. Acredita-se que um estudo de viabilidade estabeleceria um valor final em torno de 30 a 40% maior. Mesmo assim, a venda do composto traria receitas relevantes a serem consideradas no financiamento do sistema.

Nesse sentido, acredita-se que o mercado local seria capaz de absorver a quantidade de composto produzida no MCY, uma vez que há grande demanda agrícola na região e grande parte do solo está erodido devido à monocultura do café no século 19.

Em relação aos indicadores sustentáveis aplicados neste estudo, a diferença de 11 pontos a mais para o Cenário 2 não deixa dúvidas sobre qual é o melhor cenário no contexto ambiental. Destacamos a simplicidade tecnológica e o baixo custo do método indicado para a compostagem, bem como a existência de coleta seletiva e o aproveitamento de resíduos orgânicos, como as maiores vantagens do Cenário 2 nesse sentido.

Vale destacar também a economia de carbono contemplada pela prática local de compostagem – principalmente se o composto for comercializado também localmente. O uso do composto na agricultura local, em detrimento dos fertilizantes sintéticos, pode incentivar o cultivo de alimentos orgânicos na região, fechando o ciclo dos materiais orgânicos. Por fim, destaca-se que os custos não contemplados nos cálculos deste estudo de caso - a saber: depreciação de equipamentos e caminhões, taxas, impostos, encargos e benefícios dos empregados - não fariam diferença significativa na comparação entre os cenários. Isso porque, se incluídos, eles seriam adicionados apenas a ambos os cenários, de modo que a diferença final permaneceria praticamente inalterada. Como este trabalho não é um estudo de viabilidade, não foi considerado adequado detalhar tais custos.

O estudo de caso apresentado neste artigo corrobora os autores da bibliografia pesquisada, no sentido de considerar outros tratamentos de RSU antes da disposição final, como estratégia sustentável para a gestão municipal, visando menores impactos ambientais [27,28,30,38,39].

O presente trabalho reforça as recomendações de Mersoni e Reichert [27] e Marchi [28], ao sugerir que os gestores levem em consideração os fatores ambientais e sociais na tomada de decisões sobre o modelo de gestão de RSU a ser implantado nos municípios, e

destacar que o problema dos resíduos não parece ser resolvido apenas com a destinação de aterros sanitários baratos.

Nesse sentido, ressalta-se que a simplicidade tecnológica do modelo de compostagem proposto para o estudo de caso na Paraíba do Sul (Método UFSC) contribui para o sucesso no contexto local - que pode ser replicado em várias cidades brasileiras de pequeno porte. Essa ideia foi trabalhada por Marchi [28] ao comentar sobre o abandono de aterros sanitários por falta de capacidade técnica e recursos financeiros, e por Jacobi e Besen [30], que destacam a necessidade de comprometimento das prefeituras e a adequação tecnológica das soluções de gestão dos RSU.

Também em termos de custos operacionais das unidades de compostagem, é interessante mantê-lo simples, como no estudo de caso proposto. Assim, Pandyaswargo e Premakumara [39] e Wartchow et al [38] relatado, e o segundo estudo mostrou economia de 50% na implantação e operação de usinas mais simples – que recebem material segregado na fonte (apenas composto) – em detrimento das mais complexas – que recebem resíduos heterogêneos (triagem e compostagem).

Em relação à coleta seletiva de resíduos orgânicos, é interessante notar que toda cidade conta com grandes geradores, como feiras e restaurantes – estabelecimentos que podem facilmente separar os materiais para descarte, oferecendo apenas orgânicos para a coleta seletiva. O estudo de caso apresentado contribui nesse sentido, oferecendo um panorama quantitativo da geração de RSO em uma seção de um município brasileiro de pequeno porte. A obra vai ao encontro dos estudos de Gunaruwan e Gunasekara [37], Wartchow et al [38], Pandyaswargo e Premakumara [39], e Siqueira e Abreu [29] que indicam o recebimento de resíduos segregados na fonte geradora, para eficiência e sucesso das unidades de compostagem.

Em relação à avaliação quantitativa (custos), recomenda-se a realização de estudos de viabilidade para implantação e operação de pátios ou pequenas usinas de compostagem, como o MCY simulado no estudo de caso. O sucesso de alternativas semelhantes parece apontar para um caminho favorável [37,39], mas este artigo não teve como objetivo detalhar os custos, exigindo um estudo mais completo e cauteloso, que incluía também a demanda por composto orgânico na região – para saber se o modelo é viável e rentável.

Apesar disso, vale a pena mencionar dois fatores apresentados por Pandyaswargo e Premakumara [39] que contribuem para o possível sucesso da estratégia adotada no presente estudo de caso (o MCY que atende apenas alguns bairros da Paraíba do Sul). Eles

são a escala da unidade e o transporte. Os autores concluíram que quanto menor a escala, maior o controle sobre a qualidade final do composto - o que aumenta seu valor de mercado; Além disso, eles relataram que os custos de transporte são muito significativos em fábricas maiores.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou oferecer subsídios a uma alternativa complementar aos aterros sanitários, que foi validada por indicadores de sustentabilidade, com enormes ganhos ambientais: a compostagem da fração orgânica de RSU. Pretendeu-se destacar a importância de se considerar outras soluções antes da deposição de resíduos em aterros sanitários pelo município. A novidade deste trabalho está em incluir o Método UFSC em um pátio de compostagem municipal descentralizado para uma cidade com menos de 50.000 habitantes, bem como validar a proposta de manejo de RSU utilizando parte da fração orgânica empregando indicadores de sustentabilidade. Como o aterro sanitário é um dispositivo caro e de curta duração (20 anos em média), nesses termos, a compostagem pode ser uma estratégia para reduzir a quantidade de RSU em aterro. O uso dessa ferramenta pode ser adotado como estratégia de desenvolvimento sustentável para municípios de pequeno porte, potencializando o processo de tomada de decisão. Vale ressaltar que esse projeto foi o primeiro colocado na terceira edição do Concurso de Projetos de Boas Práticas Ambientais realizado pelo Comitê Intermediário da Paraíba do Sul, em 2018. O concurso teve como objetivo divulgar e premiar boas ideias e iniciativas de sucesso. Esta ação faz parte do banco de projetos do Escritório de Projetos do CBH-MPS para possível replicação nos municípios da bacia do Médio Paraíba do Sul. Espera-se que alternativas como essa possam ser consideradas pelos gestores municipais no futuro.

Esta pesquisa também colaborou para demonstrar que os ganhos sustentáveis do cenário simulado que contemplou a compostagem foram inegáveis. Além disso, seus custos não eram tão altos quanto os do cenário que desconsiderava tal solução, como o senso comum poderia supor. Esse resultado fundamenta a justificativa para considerar alternativas sustentáveis em projetos de RSU, embora haja poucos recursos financeiros disponíveis. Entende-se que a adaptação do mercado às práticas sustentáveis de resíduos sólidos ainda é necessária para adquirir capacidade técnica para responder aos novos desafios do setor. No entanto, esse fator não pode impedir a aplicação de tais práticas nos municípios - especialmente os pequenos, que têm muito a ganhar com a adoção de estratégias de

desenvolvimento sustentável. Há um desafio de incentivar os municípios a investirem cada vez mais na coleta seletiva e compostagem, reduzindo assim a quantidade de material a ser enviado para aterros sanitários e esse trabalho certamente buscou oferecer um novo ponto de vista a esse respeito. Além disso, destaca-se a relevância da compostagem para a sociedade em geral para fomentar a agricultura local e orgânica e fechar o ciclo de materiais orgânicos. Caso contrário, esses materiais seriam enviados para um aterro sanitário ou lixão, onde impactariam o meio ambiente em vez de beneficiá-lo. Além de serem valorizados por meio da compostagem, eles também podem gerar receita com a venda de composto. Há uma necessidade urgente de uma compreensão mais sistêmica do manejo dos RSU nos municípios brasileiros. Conforme destacado por Pandyaswargo e Premakumara [39], os gestores acreditam que podem ser convencidos de que podem mudar suas estratégias a partir de informações sobre os benefícios socioambientais da compostagem.

Assim, como inovação, a proposta de utilização de um método de compostagem de baixo custo, que utiliza leiras estáticas de aeração passiva em um modelo de implantação descentralizada, sendo abastecido apenas com resíduos previamente segregados em grandes fontes geradoras, é um meio de alcançar eficiência no contexto de cidades brasileiras de até 50.000 habitantes que não possuem um modelo efetivo de gestão de RSU. No entanto, este trabalho apresenta algumas dificuldades na obtenção de dados sobre a temática da compostagem de resíduos orgânicos e sobre RSU. Esses dados não são divulgados publicamente e é necessário um pedido especial e um atraso na obtenção deles. Assim, avaliações mais detalhadas sobre a gestão de pátios de compostagem são indicadas como uma recomendação futura, comparando modelos privados com a gestão municipal dessa parcela de RSU. Outra indicação para novos trabalhos seria a investigação da existência de demanda por composto orgânico na região central do estado do Rio de Janeiro, para avaliar a real possibilidade de fechamento local do ciclo do lixo orgânico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 304726/2021-4) e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ E-26400.205.206/2022(284891)) e (FAPERJ E-26/210.950/2024 (295973)).

REFERÊNCIAS

- Alfaia, R. G. de S. M., Costa, A. M., & Campos, J. C. (2017). Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research*, 35(12), 1195–1209. <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>
- Amato-Lourenco, L. F., França, G. C., Seckler, M. M., & Mauad, T. (2024). Enhancing urban waste sustainability through community-driven composting in São Paulo megacity. *Environmental Challenges*, 14, Article 100864. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100864>
- Barton, J. R., Issaias, I., & Stentiford, E. I. (2008). Carbon – Making the right choice for waste management in developing countries. *Waste Management*, 28(4), 690–698. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.033>
- Capra, F. (2005). *As conexões ocultas: Ciência para uma vida sustentável*. São Paulo, Brazil: Cultrix.
- COMLURB. (2012). *Sistema de manuseio do lixo domiciliar em edificações: Especificações técnicas*. Rio de Janeiro, Brazil: Author.
- de Lima, P. R. F. (2021). Avaliação da qualidade do serviço público de limpeza urbana de uma cidade cearense através da ferramenta SERVQUAL. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 6(2), Article 1460. <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2021vol6n21460>
- de Siqueira, T. M. O., & Assad, M. L. R. C. L. (2015). Compostagem de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo (Brasil). *Ambiente & Sociedade*, 18(4), 243–264. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC1243V1842015>
- de Siqueira, T. M. O., & de Abreu, M. J. (2016). Fechando o ciclo dos resíduos orgânicos: Compostagem inserida na vida urbana. *Ciência & Cultura*, 68(4), 38–43. <https://doi.org/10.21800/2317-66602016000400013>
- Deus, R. M., Battistelle, R. A. G., & Silva, G. H. R. (2017a). Current and future environmental impact of household solid waste management scenarios for a region of Brazil: Carbon dioxide and energy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 155(Pt 1), 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.158>
- Deus, R. M., Battistelle, R. A. G., & Silva, G. H. R. (2017b). Scenario evaluation for the management of household solid waste in small Brazilian municipalities. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(1), 205–214. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1205-0>
- Gandra, A. (2017, January). Pesquisa da ANP revela preço máximo da gasolina ao consumidor de quase R\$ 5. EBC. Retrieved November 19, 2024, from <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-01/pesquisa-da-anp-revela-preco-maximo-da-gasolina-ao-consumidor-de-quase-r>

Garré, S. O., Luz, M. L. G. S., da Luz, C. A. S., Gadotti, G. I., & Navroski, R. (2017). Análise econômica para implantação de uma usina de compostagem de resíduo orgânico urbano. *Espacios*, 38(31), 1–12.

Girardet, H. (2007). *Criar cidades sustentáveis*. Porto Alegre, Brazil: Bookman.

Governo do Estado do Rio de Janeiro, Secretaria de Estado do Ambiente. (2013). *Plano estadual de resíduos sólidos do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, Brazil: Author.

Hassan, N. Y. I., El Wahed, N. H. A., Abdelhamid, A. N., Ashraf, M., & Abdelfattah, E. A. (2023). Composting: An eco-friendly solution for organic waste management to mitigate the effects of climate change. *Innovare Journal of Social Sciences*, 11(4), 1–7. <https://doi.org/10.22159/ijss.2023.v11i4.48529>

IBGE. (2017). *Indicadores IBGE: Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD Contínua (1st ed.)*. Retrieved November 19, 2024, from https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2380/epp_2021_1tri.pdf

IBGE. (n.d.). *Cidades e estados do Brasil*. Retrieved November 19, 2024, from <https://cidades.ibge.gov.br/>

Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Sarkis, J., & Govindan, K. (2014). Brazil's new national policy on solid waste: Challenges and opportunities. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(1), 7–9. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0600-z>

Jacobi, P. R., & Besen, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: Desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, 25(71), 135–158. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142011000100010>

Liikanen, M., Havukainen, J., Viana, E., & Horttanainen, M. (2018). Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.005>

Lino, F. A. M., Ismail, K. A. R., & Castañeda-Ayarza, J. A. (2023). Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review. *Energy Nexus*, 11, Article 100232. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100232>

Maiello, A., Britto, A. L. N. de P., & Valle, T. F. (2018). Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Administração Pública*, 52(1), 24–51. <https://doi.org/10.1590/0034-7612155117>

Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M., & Nicolescu, C. M. (2024). Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: Current practices and potential improvements. *Sustainability*, 16(15), Article 6329. <https://doi.org/10.3390/su16156329>

Marchi, C. M. D. F. (2015). Novas perspectivas na gestão do saneamento: Apresentação de um modelo de destinação final de resíduos sólidos urbanos. *Urbe: Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 7(1), 91–105. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.007.001.AO06>

Massukado, L. M. (2008). Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares (Doctoral dissertation). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil. <https://doi.org/10.11606/T.18.2008.tde-18112008-084858>

Mersoni, C., & Reichert, G. A. (2017). Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: O caso do município de Garibaldi, RS. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(5), 863–875. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017150351>

Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento. (2020). Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos. Retrieved November 19, 2024, from <http://www.snis.gov.br>

Ministério do Meio Ambiente. (2006). Programa Nacional de Capacitação de Gestores Ambientais. Brasília, Brazil: Author.

Ministério do Meio Ambiente. (2010). Manual para implantação de compostagem e de coleta seletiva no âmbito de consórcios públicos. Brasília, Brazil: Author.

Ministério do Meio Ambiente. (2012). Plano Nacional de Resíduos Sólidos. SINIR. Retrieved November 19, 2024, from <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>

Ministério do Meio Ambiente. (2018). Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: Manual de orientação. Florianópolis, Brazil: Author.

Mondal, M. K., & Banerjee, A. (2015). Parametric evaluation of digestibility of organic fraction of municipal solid waste for biogas production. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3(4), 416–424. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0031>

Outubro, C. (2012). Unidades de triagem e compostagem de resíduos sólidos urbanos. Curitiba, Brazil: Author.

Pandya Swargo, A. H., & Premakumara, D. G. J. (2014). Financial sustainability of modern composting: The economically optimal scale for municipal waste composting plant in developing Asia. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3(4), Article 66. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0066-y>

Pereira, V. R., & Fiore, F. A. (2024). Opportunities and barriers to composting in a municipal context: A case study in São José dos Campos, Brazil. *Sustainability*, 16(8), Article 3359. <https://doi.org/10.3390/su16083359>

Pisano, V., Demajorovic, J., & Besen, G. R. (2022). The Brazilian National Solid Waste Policy: Perspectives of the waste pickers' cooperative networks. *Ambiente & Sociedade*, 25, Article e0151r1. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210151r1ft>

PROSAB. (2009). *Resíduos sólidos: Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras*. Rio de Janeiro, Brazil: Author.

Ragossnig, A. M., & Schneider, D. R. (2019). Circular economy, recycling and end-of-waste. *Waste Management & Research*, 37(2), 109–111. <https://doi.org/10.1177/0734242X19826776>

Rametsteiner, E., Pülzl, H., Alkan-Olsson, J., & Frederiksen, P. (2011). Sustainability indicator development—Science or political negotiation? *Ecological Indicators*, 11(1), 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.06.009>

Rogers, R. (2016). *Cidades para um pequeno planeta*. Porto Alegre, Brazil: Bookman.

Saju, J. A., Bari, Q. H., Lorber, P., Rafizul, I. M., & Kraft, E. (2024). Integrated approach of waste analysis and life cycle assessment for the management of non-recyclable plastics in recycling shops. *Cleaner Environmental Systems*, 15, Article 100229. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100229>

Santiago, L. S., & Dias, S. M. F. (2012). Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17(2), 203–212. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000200010>

Seng, B., Hirayama, K., Katayama-Hirayama, K., Ochiai, S., & Kaneko, H. (2013). Scenario analysis of the benefit of municipal organic-waste composting over landfill, Cambodia. *Journal of Environmental Management*, 114, 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.002>

Silva, M., Silva, A. H. M., Silva, A. R., Alvarenga, E., Hora, H., & Erthal, A. (2018). Avaliação da gestão de resíduos sólidos urbanos de municípios utilizando multicritério: Região norte do Rio de Janeiro. *Brazilian Journal of Development*, 4(1), 410–429.

Souza, A., Haddad, A. N., Najjar, M. K., Hammad, A. W. A., & Vazquez, E. (2020). A comparative study for two solid waste management scenarios based on sustainability indicators. In *2nd Latin American SDEWES Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Buenos Aires, Argentina. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4311143>

Tejaswini, M. S. S. R., Pathak, P., & Gupta, D. K. (2022). Sustainable approach for valorization of solid wastes as a secondary resource through urban mining. *Journal of Environmental Management*, 319, Article 115727. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115727>

Vidigal, L. L. do V. (2024). Solid waste management of the municipalities of the state of Rondônia in the Western Amazon – Brazil. In *Engineering: Its advances* (pp. 283–298). Ponta Grossa, Brazil: Seven Editora. <https://doi.org/10.56238/sevened2024.004-020>

Wartchow, D., Gewehr, A. G., & da Silva, J. S. (2011). A importância ambiental e econômica da compostagem - Estudo de caso: Município de Ijuí/RS. In *26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental* (pp. 1–10). Porto Alegre, Brazil.

Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213(3), 178–190. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0965-178>

Xocaira Paes, M., & Puppim de Oliveira, J. A. (2021). Integrated management of municipal solid waste in Brazil: A case study in São Paulo city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1196(1), Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1196/1/012004>

Zeller, V., Towa, E., Degrez, M., & Achten, W. M. J. (2019). Urban waste flows and their potential for a circular economy model at city-region level. *Waste Management*, 83, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.034>

Zhang, Y., Lashermes, G., Houot, S., Doublet, J., Steyer, J. P., Zhu, Y. G., Barriuso, E., & Garnier, P. (2012). Modelling of organic matter dynamics during the composting process. *Waste Management*, 32(1), 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.008>

Zhang, Z., Chen, Z., Zhang, J., Liu, Y., Chen, L., Yang, M., Osman, A. I., Farghali, M., Liu, E., Hassan, D., Ihara, I., Lu, K., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2024). Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa. *Science of the Total Environment*, 930, Article 172794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172794>