

AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTIMATIVAS DE CRITÉRIOS ECONÔMICO, AMBIENTAL E SOCIAL

¹Luiz Neto Paiva e Silva Müller (luizpsmuller@gmail.com), ²João Bosco Furtado Arruda (jbfarruda@gmail.com), ¹Rosane Lúcia Chicarelli Alcântara (rosane@ufscar.br), ¹Lucas Rodrigues Deliberador (deliberadorlucas@gmail.com)

¹Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

²Universidade Federal do Ceará (UFC)

Resumo: Ao longo dos anos, a gestão dos resíduos sólidos ganhou destaque em diversas sociedades do mundo. A medida que uma região aumenta suas atividades econômica, a problemática dos resíduos se intensifica. A atual gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta-se preocupante em diferentes regiões. A simples disposição de resíduos em aterros é algo recorrente, apesar de existir melhores opções. Alternativas de tratamento de resíduos surgem como uma solução para a gestão de RSU, entretanto, antes de decidir qual alternativa implementar, deve-se entender os possíveis resultados. Nesse contexto, a presente pesquisa possui o objetivo de estimar quantitativamente, em um período de vinte anos, os impactos econômicos, ambientais e sociais de cinco diferentes alternativas de tratamento de resíduos para o sistema de gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte, localizado no Estado do Ceará. Para isso, utilizou-se o método quantitativo de modelagem através da aplicação de equações/modelos matemáticos e dados primários e secundários da região. Os resultados destacam que, apesar da vantagem de algumas alternativas nos critérios avaliados, nenhuma alternativa apresentou um destaque global. Para uma melhor decisão na escolha da alternativa de tratamento de RSU, sugere-se que trabalhos futuros utilizem os resultados desta pesquisa para aplicar um método de apoio a decisão, como o AHP.

Palavras chave: RSU, Alternativas de tratamento de resíduos, Juazeiro do Norte.

EVALUATION OF ALTERNATIVES FOR URBAN SOLID WASTE TREATMENT: ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND SOCIAL CRITERIA ESTIMATES

Abstract: Over the years, solid waste management has gained prominence in several societies around the world. As a region increases its economic activities, the problem of waste intensifies. In different regions, the current Municipal Solid Waste (MSW) management is of concern. Landfill disposal is common, although there are better options. Waste treatment alternatives emerge as a solution for MSW, however, before deciding which alternative to implement, one must understand the possible outcomes. In this context, this research aims to quantitatively estimate, over a period of twenty years, the economic, environmental and social impacts of five different waste treatment alternatives for the MSW management system of the municipality of Juazeiro do Norte, located in the state of Ceará, Brazil. For this, we used the quantitative modeling method through the application of equations / mathematical models and primary and secondary data of the region. The results highlight that, despite the advantage of some alternatives in the evaluated criteria, no alternative presented a global highlight. For a better decision in choosing the alternative treatment for MSW, it is suggested that future work use the results of this research to apply a decision support method such as AHP.

Key-words: MSW, Waste Treatment Alternatives, Juazeiro do Norte.

1. Introdução

À medida que o mundo avança em direção ao seu futuro urbano, a gestão de resíduos sólidos torna-se uma das atividades mais importantes (MIAN et al., 2017). O ritmo acelerado da urbanização, que engloba a migração de pessoas das áreas rurais às urbanas, bem como uma economia crescente vêm acelerando a taxa de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em países em desenvolvimento.

A geração de resíduos sólidos é um subproduto importante das atividades socioeconômicas (SRIVASTAVA et al. 2015). Nesse contexto, as residências, estabelecimentos comerciais, instituições e atividades industriais possuem destaque na quantidade de resíduos sólidos gerados (MIAN et al., 2017). No Brasil, os resíduos sólidos são classificados, pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 11 categorias diferentes. Dentre as categorias de resíduos, o RSU é definido como a soma dos resíduos domiciliares (resultantes de práticas de origem doméstica) e de limpeza urbana (resíduos de varrição, limpeza de logradouros, entre outros) (BRASIL, 2010).

Globalmente, cerca de 1,3 bilhões de toneladas de RSU são geradas anualmente, e acredita-se que até 2025, esta quantidade aumente para cerca de 2,2 bilhões de toneladas/ano (DEUS et al., 2018). Na maioria dos países, grande parte do RSU é disposto diretamente em aterros sem um devido tratamento (MENIKPURA et al., 2016). Entretanto, pesquisas enfatizam que resíduos dispostos sem tratamento intensificam benefícios negativos ao meio ambiente e à saúde pública (THAKUR, GANGULY e DHULIA, 2018).

Fei et al. (2018) destacam que a implementação de opções de tratamento mecânico, biológico e/ou térmicos poderia ser uma possível solução do problema, gerando melhores resultados em relação à simples disposição de resíduos em aterros. No entanto, a eficácia dos métodos atuais de tratamento de resíduos não pode ser garantida, especialmente nos países em desenvolvimento (BAXTER et al., 2016). No planejamento de um sistema de gestão de resíduos sólidos de uma região e na decisão de quais alternativas de tratamento implementar, Chang e Pires (2015) sugerem que tomadores de decisões considerem diferentes aspectos, como os ambientais, econômicos e sociais.

Nesse contexto, a presente pesquisa possui o objetivo de estimar quantitativamente, em um período de vinte anos, os impactos econômicos, ambientais e sociais de 5 diferentes alternativas de tratamento de resíduos para o sistema de gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte, localizado no Estado do Ceará. Os resultados desta pesquisa visam apresentar uma visão mais ampla que pode auxiliar tomadores de decisão da região a escolher uma alternativa de tratamento de RSU mais sustentável.

2. Alternativas de gestão de resíduos sólidos urbanos

Christensen (2011) infere que tratamentos mecânicos, biológicos e térmicos podem ser utilizados separadamente ou em soluções agregadas com o intuito de recuperar resíduos recicláveis, extrair energia ou alterar certas características de resíduos sólidos como, volume e nível de contaminantes, dentre outros. Nesse sentido, opções como unidades de triagem, compostagem, digestão anaeróbica e incineração, podem ser agregadas em alternativas de gestão de RSU de modelos centralizados (maior processamento por unidade) ou descentralizados (menor processamento por unidade) (CHANG & PIRES, 2015).

A seguir, apresenta-se características econômicas, ambientais e sociais de diferentes tipos de unidades de tratamento de resíduos.

2.1. Unidade de triagem de resíduos sólidos: tratamento mecânico

De acordo com a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco – FADE (FADE, 2014), as unidades de triagem (manuais ou automatizadas), também chamadas de centros de triagem, realizam atividades de separação, limpeza e acondicionamento dos resíduos, por tipo de material, para uma posterior utilização ou venda. Os custos de implantação, operação e manutenção dessas unidades variam de acordo com quantidade de resíduos a processar. Nesse sentido, para uma quantidade de resíduos de uma população entre 10 mil até 30 mil habitantes, estima-se um valor de R\$ 502,5/t. Para uma população entre 250 mil até 1 milhão de habitantes, estima-se um valor de 179,5 R\$/t. (FADE, 2014). Com relação a geração de receita, esta é gerada pela venda do material reciclável triado e, o valor de venda, depende do mercado da região.

No contexto ambiental, além de diminuir o volume de resíduos em aterros (CHESTER et al., 2008), o material triado ajuda na diminuição da emissão de gases de efeito estufa - GEE (KING & GUTBERLET, 2013). A emissão de GEE mitigada pode ser mensurada através da quantidade de RS evitada de ser depositada em aterros (FADE, 2014).

Socialmente, segundo o *Institute for Local Self Reliance* – ILSR (ILSR, 1997), as unidades de triagem automatizadas geram cerca de 10 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratados. Em unidades manuais, aproximadamente 50 empregos são gerados para cada 10 mil toneladas de RSU tratados por ano (BRASIL, 2008).

2.2. Unidade de compostagem: tratamento biológico

A compostagem é tratamento biológico da matéria orgânica realizado através de um processo aeróbico que emite gases (ex.: CO₂ e CH₄) e gera um fertilizante orgânico com produto final (JIANG et al., 2019). De acordo com a FADE (2014), as unidades de compostagem possuem custos de investimento, e operação e manutenção de R\$86/t. e R\$84,3/t para populações entre 250 mil e 1 milhão de habitantes e entre 10 mil e 30 mil habitantes, respectivamente.

Por outro lado, segundo o Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE (CEMPRE, 2016), o produto da compostagem pode ser vendido por preços entre R\$100,00 e R\$150,00 por tonelada. A *World Wide Fund for Nature* – WWF Brasil (2015) cita que 100kg de resíduos orgânicos geram uma média 35kg de fertilizante.

Sob o contexto ambiental, a compostagem diminui a geração de GEE. A metodologia AMS.III.F considera o valor de 4,0kg e 10,0kg de gás metano para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca respectivamente (INÁCIO et al., 2010). Ademais, segundo a WWF Brasil (WWF BRASIL, 2015), além de não gerar gás carbônico (CO₂), esse tratamento diminui a quantidade de resíduos dispostos em aterro (100% do resíduo orgânico tratado) e; o tratamento de compostagem transforma todo o resíduo sólido orgânico em composto, calor, água e gases.

Em relação ao âmbito social, as unidades de compostagem geram em torno de 4 (ILSR, 1997) e 14 empregos (WWF BRASIL, 2015) em unidades manuais e mecanizadas, respectivamente, para cada 10 mil toneladas anuais de resíduos orgânicos tratados.

2.3. Unidade de digestão anaeróbica: tratamento biológico

A digestão anaeróbica é realizada por microrganismos, na ausência de oxigênio, e gera fertilizante e gás metano (biogás) que pode ser capturado para posteriormente utilização como fonte de energia (JOSHI & VISVANATHAN, 2019).

Com relação aos custos de investimento e operação e manutenção, as unidades com capacidade de processamento de 66t/dia possuem custos unitários de R\$ 137,10/t., e as unidades com capacidade de 225 t/dia possuem custos de R\$85,54/t (FADE, 2014). A receita dessas unidades pode ser obtida através da venda da energia do biogás e do composto orgânico resultante. A quantidade de energia gerada pelos biodigestores pode ser estimada por meio de modelos matemáticos (SILVA, 2015).

Os biodigestores anaeróbicos têm a capacidade de reduzir o volume do resíduo orgânico em 70% (HARTMANN & AHRING, 2005). Em usinas que também realizam a compostagem, a diminuição da quantidade de resíduo dispostos em aterro é igual a 100% do resíduo orgânico tratado. Quanto as emissões de GEE, embora de diminua as emissões, estima-se que digestores anaeróbicos geram entre 0 e 411g de gás metano e entre 181kg e 520kg de gás carbônico para cada tonelada de resíduo tratado (EUROPEAN COMMISSION, 2006).

Em relação aos empregos diretos, os biodigestores anaeróbicos geram, aproximadamente, a mesma quantidade que as unidades de compostagem. Entretanto, em biodigestores anaeróbicos que também realizam a compostagem, a quantidade de empregos gerada pode até dobrar (8 e 28 empregos).

2.4. Unidade de incineração: tratamento térmico

O tratamento térmico possui destaque na gestão de RS, realizando a queima controlada e devidamente preparada dos resíduos para diminuir o seu volume e gerar energia (YU et al., 2019). Dentre as tecnologias térmicas, a incineração é a mais antiga e utilizada. As unidades de incineração com capacidade máxima de 650 t/dia possuem custos de investimento e de operação e manutenção de R\$ 204,19/t. Para as unidades com capacidade de 1.300 t/dia, os custos de investimento, operação e manutenção chegam a ser de R\$ 171,20/t (FADE, 2014). Em relação a receita, essas unidades podem vender a energia elétrica gerada pela queima.

O tratamento térmico possui índice de redução de volume dos resíduos que variar entre 80% e 90% (LOMBARDI et al., 2015). Este tipo de tratamento, não emite CH₄, entretanto, gera uma média 0,415mg de CO₂ para cada 1,0mg de resíduo processado (JOHNKE, 2002).

Sob o aspecto social, a geração de empregos diretos é um ponto negativo do tratamento térmico. Uma unidade de incineração gera 1 emprego para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas (ILSR, 1997).

3. Aspectos metodológicos

A pesquisa utilizou o método quantitativo de modelagem para estimar impactos de diferentes alternativas de tratamento de RSU. Os métodos quantitativos, através de modelos matemáticos, podem ser usados com o intuito de analisar resultados de diferentes cenários possíveis de um sistema (MORABITO & PUREZA, 2012).

O objeto de estudo foi analisar o sistema de gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte, no Estado do Ceará, através de período de projeção foi de 20 anos (2016 a 2035). Impactos nos critérios econômico (“custos de implantação, operação e manutenção” e

“receita gerada por produtos”), ambiental (“emissão atmosférica de CH₄ e CO₂” e “volume de ocupação do aterro”) e social (quantidade de empregos) de cinco diferentes alternativas de gestão de RSU foram estimados com base em equações/modelos matemáticos e dados primários e secundários da região.

As cinco alternativas de tratamento de RSU avaliadas mesclam unidades de tratamento mecânico, químico-biológico e térmico, sendo divididas em modelos centralizados e descentralizados (Figura 1).

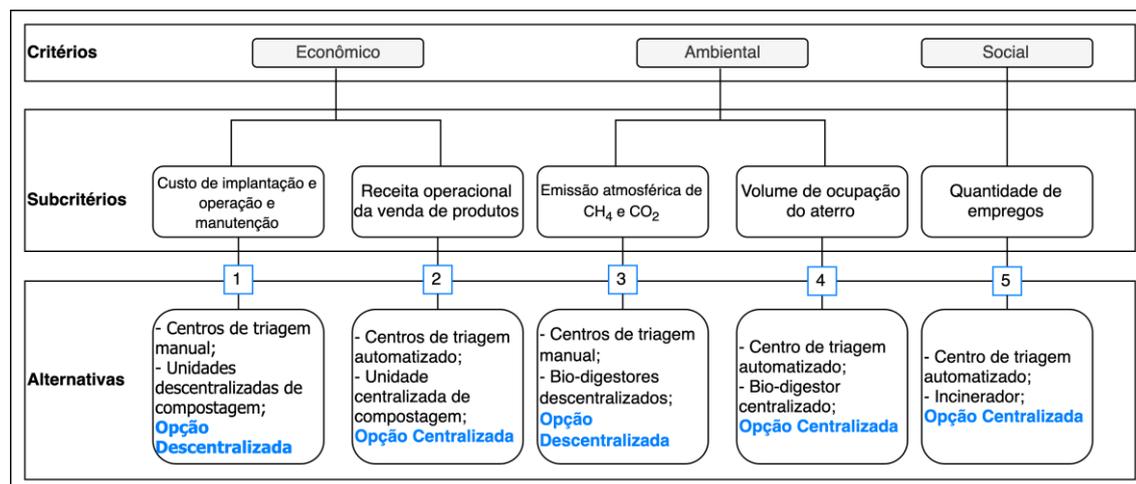


Figura 1 – Alternativas avaliadas e impactos considerados. Fonte: elaborado pelos autores.

O Quadro 1 apresenta características de cada tipo de unidade de tratamento em relação aos subcritérios citados anteriormente. Essas características foram levantadas em artigos científicos e estudos realizados por órgãos e institutos como Ministério das Cidades, Banco Mundial, CEMPRE, IPEA, WWF e FADE.

CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO → CRITÉRIO		CARACTERÍSTICAS DO TRATAMENTO						
		Centro de triagem		Unidade de Compostagem		Biodigestor (com compostagem)		Incinerador
		Manual	Automatizado	Descentralizada	Centralizada	Descentralizado	Centralizado	Centralizado
		10mil - 30mil habitantes	250mil-1milhão habitantes	10mil - 30mil habitantes	250mil-1milhão habitantes	66 toneladas de RSU/dia	225 toneladas de RSU/dia	650 toneladas de RSU/dia
Econômico	Custos de implantação e operação e manutenção (R\$/ton.)	502,5	179,5	86	84,3	137,12	85,54	204,19
	Receita operacional da venda de produtos (R\$)	Venda do material reciclável	Venda do material reciclável	Venda do Composto	Venda do Composto	Venda da energia elétrica + Venda do composto	Venda da energia elétrica + Venda do composto	Venda da energia elétrica
Ambiental	Emissão atmosférica de CH ₄ e CO ₂ (Ton.)	Não emite CH ₄	Não emite CH ₄	Entre 0,004 e 0,010 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca respectivamente	Entre 0,004 e 0,010 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca respectivamente	Entre 0 e 411e-6 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo orgânico tratado	Entre 0 e 411e-6 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo orgânico tratado	Não emite CH ₄
		Não emite CO ₂	Não emite CO ₂	Não emite CO ₂	Não emite CO ₂	Entre 0,181 e 0,520 toneladas de CO ₂ para cada tonelada de resíduo orgânico	Entre 0,181 e 0,520 toneladas de CO ₂ para cada	0,415 toneladas de CO ₂ para cada tonelada de

						tratado	tonelada de resíduo orgânico tratado	RSU tratada
	<i>Volume de ocupação do aterro (m²)</i>	Reduz 100% do resíduo triado e reciclado	Reduz 100% do resíduo triado e reciclado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz entre 80% e 90% do resíduo tratado
Social	<i>Empregos diretos</i>	50 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	10 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	14 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	4 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	28 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	8 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	1 emprego para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas

Quadro 1 – Características de cada tipo de unidade de tratamento de RSU. Fonte: elaborado pelos autores.

Além dos valores presentes no Quadro 1, o presente estudo utilizou a quantidade de diferentes equações/modelos matemáticos. A seguir, é detalhado como foi realizado os cálculos dos impactos.

3.1. Cálculo do impacto econômico

Para o cálculo do “custo de implantação, operação e manutenção”, multiplicou-se a quantidade anual de RSU processada em cada unidade (ver Figura 2) pelo (R\$/t) apontado por FADE (2014).

Em relação ao cálculo da receita gerada pela venda de materiais recicláveis (alternativas 01, 02, 03, 04 e 05), foi considerado o valor médio de venda igual a R\$0,63/kg (valor médio da região coletado em pesquisa de campo). Para a receita da venda do composto orgânico (alternativas 01, 02, 03 e 04), esta foi calculada ao multiplicar o preço médio por tonelada - R\$ 125,00/t (CEMPRE, 2016) pela quantidade anual de resíduo orgânico tratado (72.672 toneladas) e pelo percentual médio de geração de composto - 35% (WWF-BRASIL, 2015). Por fim, calculou-se a receita da venda da energia através da tarifa do Nordeste - R\$ 292,22/MWh (BRASIL, 2015) e das equações 3 e 4, para as alternativas 03 e 04, e das equações 1 e 2, para a alternativa 05.

$$P_{inc} = \eta_v \times \eta_g \times Mi(t) \times PCI \quad (2)$$

$$Ener. = P_{inc} \times \text{Horas ano} \times FC \quad (3)$$

$$P_{digest.} = \eta_m \times \eta_g \times PCI_{CH_4} \times R_B(t) \quad (3)$$

$$Ener. = P_{digest.} \times \text{Horas ano} \times FC \quad (4)$$

O cálculo da quantidade de energia produzida nos biodigestores (alternativa 03 e 04) levou em consideração os seguintes valores: $\eta_m = 0,28$ (ICLEI, 2010), $\eta_g = 98\%$ (HENRIQUES, 2004), $PCI_{CH_4} = 36$ (SILVA, 2010). Ademais, o valor do FC foi assumido como 90% e o valor de $R_B(t)$ considerou o valor médio de Moletta et al. (1986) de 74 m³ por tonelada de material orgânico (igual a 0,19 m³/s no cenário em estudo)

Já o cálculo da quantidade de energia gerada pelo incinerador (alternativa 05), utilizou os seguintes valores: $\eta_v = 33\%$ (USEPA, 2015), $\eta_g = 98\%$ (HENRIQUES, 2004), $Mi(t)$ igual a 2,94kg/s (material orgânico e outros), $PCI = 2,98$ MJ/Kg (FEAM, 2012) e $FC = 90\%$.

3.1. Cálculo do impacto ambiental

As taxas de emissões citadas por FADE (2014), Inácio et al. (2010), European Commission (2006) e Johnke (2002) foram usadas para calcular os valores de CH₄ e CO₂ emitidos por cada alternativa. Ademais, no cálculo do grau de importância, considerou-se que o CH₄ é 21 vezes mais nocivo do que o CO₂ para o efeito estufa, valor disposto por Nobre et al. (2012).

Em relação ao subcritério “ocupação do aterro”, calculou-se, por meio da equação 5, a redução da área de ocupação do aterro devido à redução do volume dos resíduos tratados. Nesse sentido, utilizou-se os valores de redução dos resíduos apontados por Chester et al. (2008), WWF- Brasil (2015) e Lombardi et al. (2015).

$$\text{Área} = R \times L \times \text{Pop} \times 1,5 / (\rho_{\text{bulk}} \times H) \quad (5)$$

3.1. Cálculo do impacto social

O cálculo da quantidade de empregos diretos gerados por cada alternativa baseou-se nas taxas apontadas por Brasil (2008) e ILSR (1997).

4. Análise dos resultados

Para a análise dos resultados, primeiramente são apresentadas as quantidades de RSU que foram levadas em consideração na projeção dos resultados. Em seguida, são apresentadas as projeções de “custos de implantação, operação e manutenção”, “receita gerada por produtos”, “emissões atmosférica de CH₄ e CO₂”, “ocupação do aterro” e “quantidade de empregos gerados” das 5 alternativas avaliadas no período 2016 a 2035. Os valores quantitativos dos subcritérios de cada alternativa foram calculados e, depois, ponderados em uma escala de 0 a 100%.

4.1. Premissa assumida

Estima-se que a geração de RSU de Juazeiro do Norte entre 2016 até 2035 cresça de 95.350 toneladas (valor calculado em pesquisa de campo) por ano para 162.172 toneladas por ano, ou seja, um aumento de 70% nos próximos 20 anos (ver Figura 2). O cálculo desses valores considerou a taxa média de crescimento anual de geração de RSU no Ceará. O valor médio de 2,69% foi calculado através das taxas dos anos de 2010 até 2014, apontadas pela ABRELPE (2012; 2013; 2014; 2015).

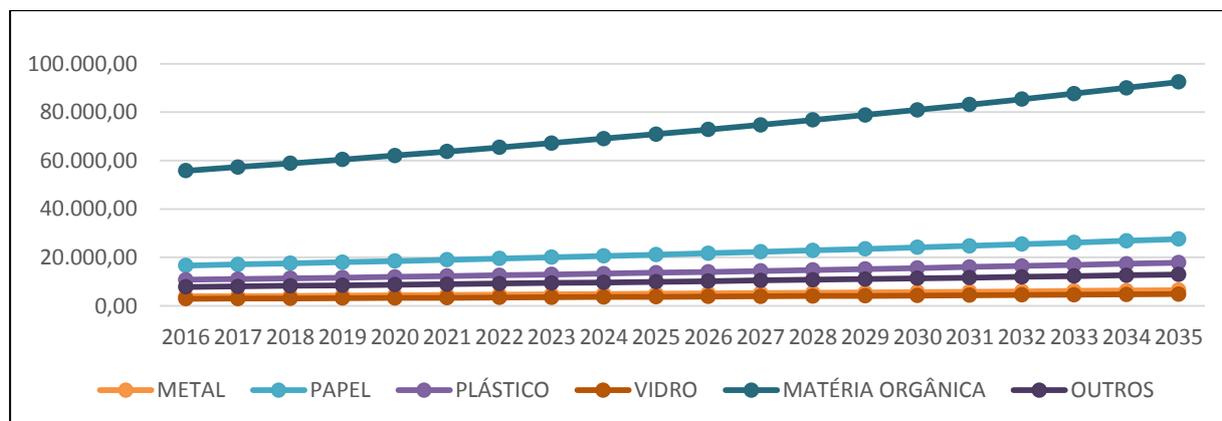


Figura 2 – Projeção de geração de RSU em Juazeiro do Norte - 2016 a 2035 (toneladas/ano). Fonte: elaborado pelos autores.

Como a composição gravimétrica foi mantida constante nesta projeção (SEMASP, 2013), a

matéria orgânica continuará sendo o principal tipo de RSU produzido pela região, chegando a um total de 92.438 toneladas no ano de 2035; no mesmo ano, serão geradas 56.760 toneladas de resíduos recicláveis.

4.2. Avaliação econômica

O Quadro 2 destaca que, em uma situação de tomada de decisão, as alternativas centralizadas 02 e 04 levam grande vantagem sobre as outras alternativas. Os custos anuais das alternativas 01, 03 e 05 são, aproximadamente, o dobro das alternativas 02 e 03 devido, principalmente, ao maior custo dos centros de triagem (alternativas 01 e 03) e ao elevado custo do incinerador (alternativa 05).

CUSTO ANUAL DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA	Unidades de tratamento	Centro de triagem	Unidade descentralizada de compostagem		
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	R\$ 28.672.849,50	14,13%
	Custo	R\$ 22.423.057,50	R\$ 6.249.792,00		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	R\$ 14.136.078,10	28,65%
	Custo	R\$ 8.009.828,50	R\$ 6.126.249,60		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	R\$ 32.387.842,14	12,51%
	Custo	R\$ 22.423.057,50	R\$ 9.964.784,64		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	R\$ 14.226.191,38	28,47%
	Custo	R\$ 8.009.828,50	R\$ 6.216.362,88		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	R\$ 24.931.462,18	16,25%
	Custo	R\$ 8.009.828,50	R\$ 16.921.633,68		

Quadro 2 – Custo anual de implantação, operação e manutenção das alternativas. Fonte: elaborado pelos autores.

Em relação ao subcritério “receita gerada por produtos”, as alternativas 03, 04 e 05 levam vantagem (entre 1 a 2%) em relação as alternativas 01 e 02, devido principalmente à venda da energia gerada nas últimas três opções. No entanto, nesse cenário, as alternativas avaliadas possuem receitas anuais próximas o que impossibilita o destaque de alguma das alternativas (ver Quadro 3).

RECEITA ANUAL GERADA POR PRODUTOS				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA	Unidades de tratamento	Centro de triagem	Unidade descentralizada de compostagem		
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	R\$ 31.194.144,38	18,87%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 3.179.400,00		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	R\$ 31.194.144,38	18,87%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 3.179.400,00		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	R\$ 34.769.611,34	21,03%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 6.754.866,96		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	R\$ 34.769.611,34	21,03%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 6.754.866,96		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	R\$ 33.390.152,32	20,20%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 5.375.407,94		

Quadro 3 – Receita anual gerada pelos produtos das alternativas. Fonte: elaborado pelos autores.

4.2. Avaliação ambiental

Os resultados da avaliação das alternativas quanto ao subcritério “Emissão atmosférica de CH₄ e CO₂” são apresentados no Quadro 4. Os dados do Quadro 4 apontam que as alternativas 01 e 02 emitem anualmente até 509 toneladas de CH₄ a mais que as outras alternativas; contudo, devido a não emissão de CO₂, elas possuem aproximadamente o triplo de vantagem na tomada de decisão em relação as alternativas 03, 04 e 05.

EMIÇÃO DE GEE NAS ALTERNATIVAS (Tonelada/ano)					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem		31,86%
	Emissão de CH ₄	0	509	509	
	Emissão de CO ₂	0	0	0	
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem		31,86%
	Emissão de CH ₄	0	509	509	
	Emissão de CO ₂	0	0	0	
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado		13,20%
	Emissão de CH ₄	0	15	15	
	Emissão de CO ₂	0	25.472	25.472	
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado		13,20%
	Emissão de CH ₄	0	15	15	
	Emissão de CO ₂	0	25.472	25.472	
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador		9,89%
	Emissão de CH ₄	0	0	0	
	Emissão de CO ₂	0	34.392	34.392	

Quadro 4 – Emissão de CH₄ e CO₂ nas alternativas consideradas. Fonte: elaborado pelos autores.

O Quadro 5 mostra que as quatro primeiras alternativas proporcionam redução de ocupação do aterro semelhante (9.775m²); já a alternativa 05 difere um pouco (9.934m²), pelo motivo de tratar e reduzir também os outros materiais e não só os recicláveis e orgânicos. Nenhuma alternativa leva vantagem considerável no grau de importância, tendo todas aproximadamente 20% de relevância na tomada de decisão.

OCUPAÇÃO DO ATERRO (m ²)					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	-9934	20,26%
	Volume de ocupação	-3719	-6215		

Quadro 5 – Ocupação do aterro nas alternativas. Fonte: elaborado pelos autores.

4.2. Avaliação social

Por fim, o Quadro 6 mostra que as alternativas descentralizadas 01 e 03 possuem ampla vantagem no grau de importância sobre as alternativas centralizadas 02, 04 e 05; as alternativas 01 e 03 juntas têm 76,60% de grau de importância na tomada de decisão, enquanto as alternativas 02, 04 e 05 têm somadas somente 23,40%. A alternativa descentralizada com biodigestores (03) lidera no critério social com um pouco mais de 2/5 da importância geral (43,52%). Por outro lado, a alternativa centralizada com incinerador (05) encontra-se em último lugar com peso de apenas 5,40%.

EMPREGOS DIRETOS GERADOS					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	321	33,10%
	Empregos	220	101		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	73	7,51%
	Empregos	44	29		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	422	43,50%
	Empregos	220	202		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	102	10,48%
	Empregos	44	58		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	52	5,40%
	Empregos	44	8		

Quadro 6 – Empregos gerados nas alternativas. Fonte: elaborado pelos autores.

4.2. Considerações finais

O presente artigo estimou, em um período de 20 anos (2016 a 2035), impactos econômico, ambiental e social de diferentes alternativas de tratamento de resíduos para o sistema de gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte no Estado do Ceará.

Os valores estimados apresentam as alternativas que tiveram destaque em cada um dos subcritérios. Por exemplo, em relação aos custos, as alternativas centralizadas 02 e 04 levam grande vantagem sobre as outras alternativas, com valores em torno de 40% menores do que a terceira melhor alternativa nesse quesito (05). Em relação ao subcritério “receita gerada por produtos”, as alternativas 03, 04 e 05 levam vantagem apresentando receita de 34.769.611, 34.769.611 e 33.390.152 R\$/ano, respectivamente.

No entanto, de forma geral, nenhuma alternativa apresentou destaque absoluto. Cada um desses impactos possui pesos diferentes, dependendo da perspectiva do tomador de decisão. Para estudos futuros, sugere-se que trabalhos futuros apliquem algum método de apoio de decisão (ex.: AHP) de forma a ponderar os resultados apresentados e apontar uma alternativa preferível a ser implementada na região.

Referências

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011**. 2012.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. 2013.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. 2014.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. 2015.

BAXTER, J. et al. **Attitudes toward waste to energy facilities and impacts on diversion in Ontario, Canada**. Waste management, v. 50, p. 75-85, 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Elementos para a organização da coleta seletiva e projeto dos galpões de triagem**. 2008. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/ManualColetaSeletiva.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2016.

BRASIL. **Política nacional de resíduos sólidos**. Lei federal número 12.305. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2015. **Anuário estatístico de energia elétrica 2015**: Ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

CEMPRE. **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. Artigos e publicações: ficha técnica composto urbano. 2016. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/10/composto-urbano>>. Acesso em: 15 mai. 2016

CHANG, N. B.; PIRES, A. **Sustainable solid waste management: a systems engineering approach**. New Jersey: IEEE Wiley. 2015.

CHESTER, M.; MARTIN, E.; SATHAYE, N. **Energy, greenhouse gas, and cost reductions for municipal recycling systems**. Environmental Science & Technology. v. 42, p. 2142–2149, 2008.

CHRISTENSEN, T. H. **Solid waste technology and management**. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 2011.

DEUS, R. M.; BEZERRA, B. S.; BATTISTELLE, R. A. G. **Solid waste indicators and their implications for management practice**. International journal of environmental science and technology, v. 16, n. 2, p. 1129-1144, 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Integrated pollution prevention and control**: reference document on best available techniques for the waste treatment industries. 2006.

FADE. **Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco**. Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Grupo de resíduos sólidos. UFPE/BNDES. Jul., 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/ep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente. 294 p. 2012.

FEI, F. et al. **Mechanical biological treatment of municipal solid waste**: Energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis. Journal of Cleaner Production, v. 178, p. 731-739, 2018.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. **Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste**: influence of co-digestion with manure. Water Research. v. 39, p. 1543–1552, 2005.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos**: uma abordagem tecnológica. 2004. 203 f.. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ICLEI. **Manual para aproveitamento de biogás volume 2**: efluentes urbanos. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

ILSR. Institute for Local Self-Reliance. **Waste to wealth**: recycling means business. Washington, DC, 1997. Disponível em: <<https://ilsr.org/recycling-means-business/>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

INACIO C. T; BETTIO D. B. B.; MILLER P. R. M. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissões de metano**. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

- JIANG, Y. et al. **Air bag bioreactor to improve biowaste composting and application.** Journal of Cleaner Production, v. 237, 2019.
- JOHNKE, B. **Emissions from waste incineration: good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.** Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. p. 455-468, 2002.
- JOSHI, P.; VISVANATHAN, C. **Sustainable management practices of food waste in Asia : Technological and policy drivers.** Journal of Environmental Management, v. 247, n. June, p. 538–550, 2019.
- KING, M. F.; GUTBERLET, J. **Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: a case study of Ribeirão Pires, Brazil.** Waste management. v. 33, p. 2771–2780, 2013.
- LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. **A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste.** Waste Management. v. 37, p. 26-44, 2015.
- MENIKPURA, S. N. M.; SANG-ARUN, J.; BENGTSOON, M. **Assessment of environmental and economic performance of Waste-to-Energy facilities in Thai cities.** Renewable energy, v. 86, p. 576-584, 2016.
- MIAN, Md Manik et al. **Municipal solid waste management in China: a comparative analysis.** Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 19, n. 3, p. 1127-1135, 2017.
- MOLETTA, R.; VERRIER, D.; ALBAGNAC, G. **Dynamic modelling of anaerobic digestion.** Water Research. v. 20, n. 4, p. 427-434, 1986.
- Morabito, R., & Pureza, V. (2012). **Modelagem e simulação.** In P. A. C. Miguel (coord.). Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. (2.ª ed., Cap. 8, pp. 166-198). Rio de Janeiro: Elsevier.
- NOBRE, C. A; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas.** São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p
- SEMASP. Secretaria de Meio Ambiente Agricultura e Serviços Públicos. **Plano de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos - PGIRSU.** Secretaria de Meio Ambiente Agricultura e Serviços Públicos Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano - SEMASP. Juazeiro do Norte, Ceará, 2013.
- SILVA, E. R. **Modelagem matemática da produção e transporte de biogás em aterros sanitários.** 2010. 82 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Pós-Graduação em Energia. Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, 2010.
- SILVA, E. R. S. **Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas de tratamento.** Tese (Pós-graduação em Energia) - Universidade Federal do ABC - Santo André – São Paulo, 2015.
- SRIVASTAVA, Vaibhav et al. **Urban solid waste management in the developing world with emphasis on India: challenges and opportunities.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 14, n. 2, p. 317-337, 2015.
- THAKUR, P.; GANGULY, R.; DHULIA, A. **Occupational Health Hazard Exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India.** Waste Management, v. 78, p. 483–489, 2018.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Landfill gas emissions model v.3.02.** 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls>>. Acesso em: 09 dez. 2015.
- WWF BRASIL. **Guia para a compostagem: orientação para o aproveitamento de resíduos orgânicos em sistemas de pequeno e médio porte.** Brasília, WWF-Brasil, 2015.
- YANG, D. et al. **Inventories and reduction scenarios of urban waste-related greenhouse gas emissions for management potential.** Science of the Total Environment, v. 626, p. 727–736, 2018.
- YU, S. et al. **Science of the Total Environment Thermal treatment of flame retardant plastics: A case study on a waste TV plastic shell sample.** Science of the Total Environment, v. 675, p. 651–657, 2019.