

Artigo Técnico

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

Comparison of municipal solid waste treatment scenarios through the technique of Life Cycle Assessment: the case of the city of Garibaldi, RS, Brazil

Cristina Mersoni¹, Geraldo Antônio Reichert²

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) vem sendo utilizada como apoio à tomada de decisão para avaliação e escolha de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU). O objetivo desta pesquisa foi analisar cenários de gerenciamento de resíduos para o município de Garibaldi, Rio Grande do Sul, por meio da técnica da ACV. Cinco cenários foram simulados integrando processos de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia e incineração, para os quais foi elaborado o Inventário do Ciclo de Vida, utilizando o programa computacional IWM-2, que calcula os subprodutos das tecnologias de tratamento avaliadas e seus respectivos inventários do ciclo de vida, em termos de consumo de energia, emissões à água, ao ar, e ao solo. Para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, foram aplicados cálculos atribuídos às categorias de impacto ambiental: mudanças climáticas, formação de foto-oxidantes, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e aos indicadores uso de energia e disposição de resíduos sólidos secos e orgânicos em aterro. Os cenários que contemplaram a reciclagem associada à compostagem, a reciclagem associada à digestão anaeróbia seguida por compostagem e a reciclagem associada à compostagem com a incineração de rejeitos e com recuperação de energia apresentaram o melhor desempenho ambiental, de modo que são indicados como possíveis soluções de tratamento dos RSU para o município estudado.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; resíduos sólidos urbanos; indicadores ambientais; apoio à tomada de decisão.

ABSTRACT

The Life Cycle Assessment (LCA) has emerged as an effective technique to evaluate municipal solid waste management systems (MSW), serving as support for decision making of the best model to be adopted. The objective of this research was to analyze scenarios through the LCA technique in the city of Garibaldi, Rio Grande do Sul, Brazil, comparing different alternatives of treatment and final disposal of MSW under the environmental aspect, and contribute to decision making, based on the study of the city of Garibaldi (RS). Five scenarios were simulated integrating processes such as recycling, composting, anaerobic digestion and incineration, for which the Life Cycle Inventory was prepared by means of the IWM-2 software, which calculates the evaluated treatment technologies by products and their respective life cycle inventories, in terms of energy consumption, emissions to water, air, and soil. For the Life Cycle Impact Assessment, calculations were applied to the categories of environmental impact, namely climate change, photo-oxidants formation, acidification, eutrophication and human toxicity, and indicators of energy use and recyclable and organic waste disposal into landfills. The scenarios that contemplated recycling associated with composting, recycling associated with anaerobic digestion followed by composting, and recycling associated with composting with incineration of waste and with energy recovery presented the best environmental performance, so they are indicated as possible treatment solutions for municipal solid waste in the case that was analyzed.

Keywords: Life Cycle Assessment; municipal solid waste; environmental indicators; decision-making support.

INTRODUÇÃO

A partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos, sancionada em 2010, os municípios brasileiros foram obrigados a repensar a limpeza urbana e o manejo de resíduos. A responsabilização e as ações impostas pela lei levaram à busca por alternativas corretas de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

O diagnóstico do manejo de RSU realizado por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) apontou, no ano de 2014, que a coleta de resíduos domiciliares e públicos nos municípios brasileiros alcançou o montante de 64,4 milhões de toneladas, aproximadamente 176,4 mil toneladas por dia (BRASIL, 2016).

¹Bióloga. Mestra em Engenharia e Ciências Ambientais pela Universidade de Caxias do Sul (UCS) - Caxias do Sul (RS), Brasil. Bióloga da Companhia Riograndense de Saneamento (Corsan).

²Engenheiro Civil. Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS. Professor e pesquisador da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Engenheiro do DMLU de Porto Alegre.

Endereço para correspondência: Cristina Mersoni - Rua Ernesto Alves, 335 - Vale dos Pinheiros - 95720-000 - Garibaldi (RS), Brasil - E-mail: crismersoni@gmail.com.

Recebido: 05/06/15 - **Aceito:** 26/05/17 - **Reg. ABES:** 150351

Ainda de acordo com o diagnóstico, os aterros sanitários permanecem como a tecnologia predominante para a disposição de RSU, seguidos por unidades de triagem e compostagem. Do total coletado em 2014, 52,4% foram dispostos em aterro sanitário, 13,1% em aterros controlados, 12,3% em lixões e somente 3,9% seguiram para unidades de triagem e de compostagem, restando uma parcela de 18,3% sem informação (BRASIL, 2016).

Os municípios, ao depararem com a quantidade de resíduos gerada em seu território e frente à necessidade de soluções práticas e imediatas, acabam adotando medidas desprovidas de análises técnicas, considerando principalmente a questão financeira para implementar novos mecanismos para o gerenciamento dos resíduos.

Teoricamente, a maior parte dos resíduos dispostos em aterros sanitários pode ser reciclada; porém, fatores técnicos e econômicos inviabilizam vários processos, restando como alternativa o descarte (DMITRIJEVAS, 2010).

Uma das principais dificuldades de gestores e usuários é decidir entre as diferentes opções tecnológicas existentes. Segundo Mourad *et al.* (2002), nenhum sistema de gerenciamento consegue tratar todo o material presente nos RSU com a adoção de um único tratamento. Faz-se necessária a aplicação de uma série de tratamentos, incluindo, por exemplo: reciclagem, tratamento biológico, incineração e aterro.

Frente a esse panorama, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresenta-se como uma técnica de apoio à tomada de decisão sobre o modelo a ser adotado para o gerenciamento de resíduos. Por considerar todo o ciclo de vida do sistema de gerenciamento, desde a geração até a disposição final, pode auxiliar as organizações governamentais no planejamento estratégico e na definição de processos de tratamento.

A ACV é definida como uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto ou serviço, a partir de um inventário de entradas e saídas (de recursos e energia, de emissões no ar, na água e no solo), desde a extração da matéria-prima até a disposição final (ABNT, 2001).

Xará *et al.* (2001), exemplificando a aplicação da ACV na gestão de resíduos, apontam seu uso para avaliar diferentes cenários de tratamento, para o desenvolvimento de estratégias de gestão em longo prazo e para identificar as cargas ambientais associadas aos sistemas. Segundo o autor, a ACV ajusta-se à realidade local, usando dados da infraestrutura existente, de modo a viabilizar um planejamento de forma objetiva. Para Massukado (2004), o uso da técnica de cenários é recomendado em situações em que a qualidade do gerenciamento está insatisfatória, o ambiente passou ou passa por mudanças e o agente responsável por tomada de decisões tem dificuldades para prever ou adaptar-se ao futuro.

Nessa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo analisar diferentes cenários como proposições para o gerenciamento de RSU por meio da técnica de ACV, considerando o desempenho ambiental, de modo a obter resultados de apoio à tomada de decisão quanto ao

modelo a ser adotado no sistema de gerenciamento de resíduos do município de Garibaldi, Rio Grande do Sul.

Referencial teórico

Ao tratar sobre o gerenciamento de RSU, é relevante esclarecer inicialmente os conceitos de resíduos e de gerenciamento.

Para Tchobanoglous *et al.* (1993), resíduos sólidos são todos os resíduos resultantes de atividades humanas e de animais, geralmente sólidos, e que são descartados como inúteis e indesejáveis. Segundo McDougall *et al.* (2004), um material somente se torna resíduo no momento em que é descartado, quando não tem mais valor para seu dono. Na língua portuguesa, a palavra “resíduo” é definida como “o que resta de qualquer substância, resto” (FERREIRA, 2008), ou seja, aquilo que sobra.

A Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010) estabelece como RSU os resíduos de origem domiciliar, de atividades domésticas em residências urbanas, de limpeza urbana originários de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, e demais serviços de limpeza urbana. Ainda, a lei diferencia o termo “rejeito” como aquele resíduo para o qual não há possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, sendo a disposição final ambientalmente adequada a única alternativa.

A partir do momento em que são gerados, os resíduos necessitam receber o tratamento correto para evitar que se tornem causadores de impactos ambientais. Para isso, é importante adotar um sistema eficaz que contemple todas as fases pelas quais o resíduo passará, desde a sua origem até a disposição final.

O gerenciamento de resíduos engloba as etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento, destinação final dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). De acordo com Lima (2000), o gerenciamento de resíduos sólidos é pautado nos aspectos tecnológicos e operacionais, envolvendo fatores administrativos, gerenciais, econômicos, ambientais, de desempenho (produtividade e qualidade), incluindo prevenção, redução, segregação, reutilização, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento, recuperação de energia e destinação final.

Para definir um sistema de gerenciamento, é fundamental conhecer a situação atual de geração de resíduos, bem como avaliar as possíveis rotas para o material, as tecnologias disponíveis e os aspectos ambientais. Nesse contexto, a ACV tem se apresentado como uma técnica adequada de gestão ambiental para auxiliar na tomada de decisões no gerenciamento de RSU.

A estrutura metodológica da ACV inclui o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV). O ICV tem a capacidade de estimar as cargas ambientais envolvidas em um sistema de gerenciamento de resíduos. Essa etapa envolve a construção de um balanço de massa e energia a partir de entradas (resíduos, energia, outros materiais), e da identificação de saídas, com resultados expressos

em: consumo de energia, emissões atmosféricas e líquidas, rejeito, material recuperado, composto e energia recuperada (MCDOUGALL, 2004).

Para a AICV, são utilizados os resultados do ICV. Nessa etapa, é realizada a classificação, caracterização e ponderação dos dados (ABNT, 2001). Na AICV, os resultados do inventário são associados a uma categoria de impacto como, por exemplo, mudanças climáticas. Na caracterização, colocam-se em uma mesma base diferentes parâmetros que contribuem para a mesma categoria — por exemplo, todas as substâncias que contribuem para as mudanças climáticas são somadas, expressas como equivalente de CO₂, cuja grandeza é calculada a partir do potencial de aquecimento global de cada substância (MOURAD *et al.*, 2002).

Vários estudos já utilizaram a metodologia de ACV para o gerenciamento de resíduos, como pode ser observado nos estudos feitos por Dmitrijevas (2010), Pavan (2010), Lima (2012) e Jucá *et al.* (2014).

Reichert (2013), ao aplicar a ACV em sistemas de gerenciamento integrado de RSU do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, abordou, além da questão ambiental e econômica, a participação social na definição de modelos de gerenciamento. Os resultados mostraram que o uso de técnicas estruturadas, como a ACV, auxilia na construção de possíveis cenários futuros, permitindo a escolha por alternativas que atendam a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), especialmente quanto à otimização da reciclagem com o envio apenas de rejeitos para aterro sanitário.

Dentre as soluções para a gestão de resíduos sólidos, o uso da ACV ainda desponta em políticas públicas. Carente de incentivo governamental, sua aplicação por atores específicos auxiliaria a difundir a cultura de ACV para a redução do uso de materiais e superação de problemas ambientais (Moura *et al.*, 2016).

Outros exemplos de aplicação da ACV para avaliações de cenários ou possibilidades de gerenciamento de RSU são apresentados na Tabela 1.

A PNRS coloca como objetivo a universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana com a adoção de mecanismos que assegurem a sustentabilidade operacional e financeira, cabendo ao poder público o manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Todavia, em grande parte dos municípios brasileiros os recursos provenientes da taxa de limpeza pública não cobrem as despesas da prestação do serviço (TENORIO; ESPINOSA, 2004; JUCÁ *et al.*, 2014). Tal situação pode levar à disposição incorreta dos resíduos e reflete a limitação dos municípios para investimentos em novas tecnologias.

Aliado a isso, verifica-se a falta de hábito de registrar sistematicamente os dados operacionais dos serviços de limpeza urbana na maioria dos municípios (BRASIL, 2016). Consequentemente, os diagnósticos ficam limitados a retratar a situação da gestão de resíduos sólidos no país de modo a aproximar-se da realidade, porém, a ausência de informações precisas dificulta a realização de estudos para um inventário brasileiro.

Tabela 1 – Alguns estudos de caso de Avaliação do Ciclo de Vida aplicados ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Local	Objetivo e escopo	Principais conclusões	Autor/referência
Bolonha, Itália	ACV de diferentes estratégias de gerenciamento de RSU	ACV permite verificar o melhor cenário, sendo que no estudo a reciclagem e a incineração tiveram os efeitos mais benéficos	Buttol <i>et al.</i> (2007)
Macau, China	Avaliar situação atual e cenários futuros por meio da ACV	Melhores cenários foram o 4 (separação na fonte e incineração) e 5 (gerenciamento integrado, com separação na fonte, compostagem e incineração). No entanto, levando em conta questões econômicas, o cenário 4 foi o mais indicado	Song <i>et al.</i> (2013)
Nápoles, Itália	Analisar diferentes estratégias de gerenciamento de RSU	Especificidades locais (instalações, matriz energética, composição dos resíduos, etc.) e simplificação da ACV pode levar a erros no processo de decisão. No caso de Nápoles, a inexistência de coleta seletiva levou aos maiores impactos ambientais	Ripa <i>et al.</i> (2017)
Liège, Bélgica	Avaliação de cenários de tratamento de RSU incluindo produção de energia e calor	A substituição do aterro pela incineração reduz significativamente a emissão de poluentes e depleção de energia. Uma análise de sensibilidade mostrou a importância do contexto energético	Belboom <i>et al.</i> (2013)
Zhangqiu, China	Avaliar a sustentabilidade de cenários para a tomada de decisão para o gerenciamento de RSU	O cenário com recuperação de material, compostagem e aterro sanitário é preferível ao cenário com incineração e aterro sanitário	Li <i>et al.</i> (2015)
Cardiff, Gales	Análise de cenários para avaliar o desempenho ambiental quanto à emissão de gases do efeito estufa no gerenciamento de RSU	A ACV pode fornecer informações valiosas sobre o desempenho ambiental no gerenciamento de RSU, podendo ser utilizada pelos gestores para tomada de decisão. A maior emissão de gases do efeito estufa ocorreu nos cenários com a disposição de resíduos em aterro sanitário	Turner <i>et al.</i> (2016)

ACV: Avaliação do Ciclo de Vida; RSU: resíduos sólidos urbanos.

É nessa perspectiva teórica que este trabalho de insere, com o intuito de contribuir com a tomada de decisões na definição de modelos a serem adotados para o gerenciamento dos RSU por meio do uso da ACV.

Metodologia

A metodologia encontra-se dividida em cinco etapas principais, conforme descrito a seguir. Destaca-se que será adotado o termo “resíduo sólido urbano” (RSU) para englobar os resíduos de origem domiciliar, de limpeza urbana, comercial, de prestadores de serviços e institucionais, devido a serem geralmente recolhidos pelo sistema de coleta pública. São estes os resíduos que integram os dados analisados na presente pesquisa, pois são normalmente gerenciados pelos municípios, em especial no município de Garibaldi.

O termo “coleta de resíduos sólidos mistos” constitui os resíduos coletados sem prévia separação na fonte geradora (misturados). E “coleta seletiva de resíduos sólidos” é utilizado para os resíduos previamente segregados no local gerador e recolhidos pela coleta seletiva do município.

Etapa 1: Levantamento de dados

Em Garibaldi, cuja população é de 32.578 habitantes (IBGE, 2013), o serviço de coleta de resíduos sólidos domiciliares atende 100% da área municipal. Foram obtidos dados de coleta, de material triado e comercializado pela cooperativa de catadores (quantidade em tonelada por ano), transporte, destinação final dos resíduos e consumo de energia.

A determinação da composição gravimétrica dos resíduos mistos e do rejeito seguiu o método de quarteamento, conforme descrito por Pessin *et al.* (2002). Os componentes presentes nas amostras foram identificados nas seguintes categorias: matéria orgânica putrescível (cascas, restos de alimentos, resíduo verde de poda), plásticos, papel/papelão, vidros, metais, material têxtil, rejeitos (papel higiênico, contaminantes biológicos, outros).

O panorama geral da composição gravimétrica dos RSU coletados no município foi obtido a partir da composição dos resíduos mistos (coleta não seletiva), da composição do rejeito e do levantamento do material comercializado (Tabela 2).

Nessa etapa foram definidos os limites do sistema, abrangendo todo o ciclo de vida dos resíduos desde a geração, a coleta, o transporte e o transbordo, o tratamento, a destinação, até a disposição final. Dados quantitativos e a composição gravimétrica dos resíduos também foram levantados.

Etapa 2: Sistematização de cenários

Para a sistematização dos cenários, foram identificadas as etapas de gerenciamento de RSU adotadas em Garibaldi. O cenário CEN 1BASE representa o modelo de gerenciamento no município referente ao ano de 2013, abrangendo a coleta de resíduos seletivos e mistos, transporte, triagem dos resíduos seletivos, reciclagem e disposição final em aterro sanitário (Figura 1).

Considerando as metas da PNRS, visando a diminuir gradativamente a quantidade de material disposto em aterro, foram propostos cinco cenários com diferentes rotas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos. A unidade funcional adotada para o fluxo de massa em todos os cenários, em cada etapa, foi tonelada por ano (t/ano). As etapas dos cenários, bem como a massa de resíduos contabilizada em cada fase, encontram-se apresentadas na Tabela 3.

No cenário CEN 2TOT, é simulada uma otimização da reciclagem de material proveniente da coleta seletiva de resíduos. Nesse cenário, considera-se que, da coleta seletiva, somente rejeitos e matéria orgânica são encaminhados para aterro sanitário, sendo somados aos resíduos da coleta mista; isso representa 78% do total de resíduos coletados. Assim, apenas 22% de todo resíduo recolhido é efetivamente reciclado.

No cenário CEN 3CTRAS, sugere-se que ocorra uma melhora na separação na fonte geradora e, conseqüentemente, um aumento do índice de resíduos seletivos encaminhados para a triagem e reciclagem. Assim, a coleta de resíduos seletivos apresentaria 2.904 t/ano, com 12% (348 t/ano) de rejeito e 35% (2.556 t/ano) de material efetivamente reciclado. E a coleta de resíduos mistos apresentaria 4.358 t/ano. Do total de resíduos gerenciados, 65% (4.706 t/ano) ainda teriam como destino o aterro sanitário.

Para o cenário CEN 4TRCAS, com base nos dados da composição gravimétrica, tem-se que, do total de 4.358 t/ano de resíduos mistos coletados, 43,2% (1.883 t/ano) consistem em matéria orgânica putrescível. Assim, nesse cenário é proposto o tratamento por compostagem.

No cenário CEN 5TRDAS, simula-se o tratamento da matéria orgânica putrescível por digestão anaeróbia, com geração de energia a partir do biogás gerado, seguida por compostagem. Assim, do total de 4.358 t/ano de resíduos mistos coletados, 43,2% (1.883 t/ano) consistem em matéria orgânica putrescível que pode ser destinada ao tratamento biológico.

Tabela 2 – Composição em massa e porcentagem dos resíduos sólidos urbanos.

Material	Composição dos RSU	
	t/ano	%
Metal	52	0,7
Vidro	132	1,8
Material têxtil	616	8,5
Papel	1.320	18,2
Plástico	1.518	20,9
Matéria orgânica	1.671	23,0
Rejeitos	1.952	26,9
Total	7.262	100

RSU: resíduos sólidos urbanos.

Para o cenário CEN 6TRIAS, além do tratamento biológico (compostagem), sugere-se o envio do rejeito proveniente das etapas de triagem (de resíduos seletivos e mistos) e compostagem para o tratamento térmico (incineração), com recuperação de energia. Nessa simulação, considerou-se o encaminhamento do rejeito para uma central de incineração regional, sendo contabilizado, portanto, o transporte do material da unidade de triagem e compostagem até a unidade de tratamento.

Etapa 3: Inventário do Ciclo de Vida

Para o ICV foi utilizado o programa computacional *Integrated Solid Waste Management (IWM-2)*. O programa, desenvolvido por McDougall *et al.* (2001), permite simular cenários a partir de dados como geração, coleta, tratamento biológico (compostagem e digestão anaeróbia), tratamento térmico (incineração e combustível derivado de resíduo — CDR), reciclagem e disposição final de resíduos (aterro sanitário), determinando

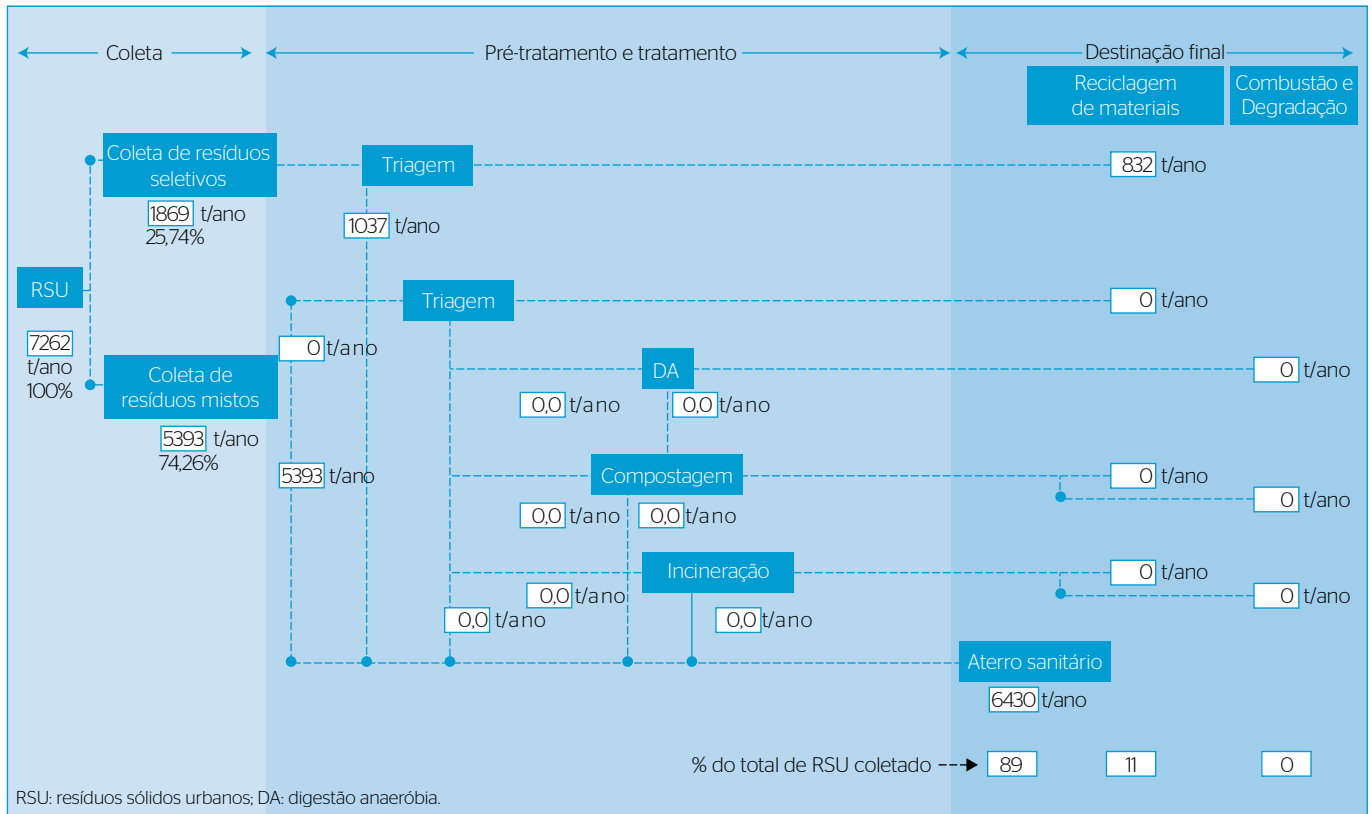


Figura 1 - Fluxo de massa do cenário CEN 1BASE do município de Garibaldi.

Tabela 3 - Massa de resíduos (t/ano) nos cenários propostos.

Cenários	Coleta (t/ano)		Tratamento (t/ano)					Destinação final (t/ano)		
	Seletiva	Resíduos mistos	Triagem - seletiva	Triagem - mistos	Digestão anaeróbia	Compostagem	Incinerção	Aterro sanitário	Reciclagem de material	Combustão
CEN 1BASE	1.869	5.393	1.869	-	-	-	-	6.430	832	-
CEN 2TOT	1.869	5.393	1.869	-	-	-	-	5.673	1.589	-
CEN 3CTRAS	2.904	4.358	2.904	-	-	-	-	4.706	2.556	-
CEN 4TRCAS	2.904	4.358	2.904	4.358	-	1.883	-	2.330	3.991	941
CEN 5TRDAS	2.904	4.358	2.904	4.358	1.883	1.318	-	2.321	3.717	1.224
CEN 6TRIAS	2.904	4.358	2.904	4.358	-	1.883	2.330	469	3.994	2.799

as cargas ambientais e os impactos potenciais relacionados ao sistema. Como o programa IWM-2 foi feito para realizar o ICV especificamente para sistema de gerenciamento de RSU, não estando associado a nenhum banco de dados dos mais conhecidos do mercado de ACV, ele tem um banco de dados interno que não permite muitas alterações, somente algumas, como, por exemplo, os dados para a matriz energética local e outros elementos referentes aos sistemas de gerenciamento dos resíduos que podem ser adaptados à realidade brasileira.

A partir da tela de entrada do programa, é possível visualizar o inventário de fluxo de materiais para cada uma das opções de tratamento. Na tela *Waste Flow* é apresentado de forma esquemática o fluxo de massa de resíduos gerenciados no sistema. Como resultados, o programa exibe informações de custos, energia (consumida e gerada), resíduo sólido final, substâncias emitidas para a atmosfera e emissões líquidas, todas em relação à unidade funcional (tonelada de RSU). Na opção *Advanced* é possível alterar parâmetros padrões do programa a fim de adequar ao sistema de gerenciamento de resíduos proposto para cada cenário, permitindo que o modelo europeu da ferramenta possa ser aplicado à realidade local.

Nessa etapa, foram quantificadas todas as entradas (resíduos, energia, materiais) e saídas (emissões para o ar, para a água e resíduo sólido final) do sistema de gerenciamento de RSU. No ICV, considerou-se como início do ciclo de vida do resíduo o momento de sua geração (quando disposto em cesto), até o momento em que retorna ao ambiente na forma de rejeito, composto ou energia.

Etapa 4: Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Para a AICV, foram utilizados indicadores ambientais classificados por categoria de impacto. As categorias foram selecionadas com base em Den Boer *et al.* (2005a; 2005b) e encontram-se, com os respectivos indicadores, apresentadas na Tabela 4.

A partir dos resultados gerados no ICV de emissões gasosas e líquidas, por meio do programa IWM-2, foram realizados os cálculos dos indicadores ambientais conforme metodologia descrita por Den Boer *et al.* (2005b). O resultado em cada categoria de impacto foi normalizado, sendo o valor final dividido pelo fator de normalização sugerido por Guinée *et al.* (2001), resultando em termos de equivalentes populacionais (EP — habitantes). Para possibilitar a comparação entre as categorias de impacto nos cenários avaliados, os valores normalizados foram divididos pelo número de habitantes do município, resultando no valor em porcentagem.

Além dessas categorias, com base em Reichert (2013), foram aplicados mais três indicadores para avaliação dos cenários, a citar: uso de energia (equivalente energético líquido total do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos); disposição de resíduos sólidos “secos” potencialmente recicláveis dispostos em aterro sanitário; e disposição de resíduos sólidos “orgânicos” potencialmente recicláveis dispostos em aterro sanitário.

Nessa etapa, buscou-se identificar os cenários que melhor atenderiam a uma situação real de tomada de decisão no planejamento futuro do modelo de gerenciamento de RSU para o município de Garibaldi, como apoio à tomada de decisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A AICV foi realizada para os seis cenários, cujos resultados, para cada categoria de impacto e para os indicadores ambientais, encontram-se descritos a seguir.

Os resultados normalizados referentes às categorias de impacto mudanças climáticas (MdCl), formação de foto-oxidantes (FoFO), acidificação (Acid), eutrofização (Eutr) e toxicidade humana (ToHu), expressos em equivalente populacional, são apresentados na Figura 2.

Destaca-se que os resultados nos gráficos que apresentam valores negativos indicam que há ganho ambiental (redução de emissões). E os

Tabela 4 – Categorias de impacto e indicadores ambientais para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.

Categoria de impacto ambiental	Resultado do ICV relacionado à categoria de impacto		Resultado do indicador
	Substância emitida para a atmosfera	Substância emitida para a água	
Mudanças climáticas	CO ₂ ; N ₂ O; CH ₄	-	kg CO ₂ eq.
Formação de foto-oxidantes	CO; CH ₄ ; NOx; SO ₂	-	kg C ₂ H ₄ eq.
Acidificação	Amônia, NOx; SO ₂	-	kg SO ₂ eq.
Eutrofização	Amônia, NOx	Amônio, DQO, Nitrito, Fosfato	kg PO ₄ eq.
Toxicidade humana	Amônia, Arsênico, Cadmio, Cromo, Cobre, Dioxinas, HCl, HF, Chumbo, Mercúrio, Níquel, NOx, SO ₂ , Zinco	Arsênico, Bário, Cadmio, Cromo, Cobre, Dioxinas, Fluoreto, Chumbo, Mercúrio, Níquel, Fenóis, Zinco	kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq.

ICV: impacto do ciclo de vida; DQO: demanda química de oxigênio.

Fonte: Adaptado de Den Boer *et al.* (2005a; 2005b).

valores positivos apontam os impactos ambientais (emissões líquidas e gasosas). A seguir, os resultados para cada cenário estão comentados.

Categoria mudanças climáticas

Analisando a Figura 2, é possível verificar que o cenário CEN 1 BASE (cenário atual) apresentou a maior contribuição para a categoria MdCl; ou seja, é o cenário que concentrou a maior emissão de gases causadores do efeito estufa para a atmosfera, sendo, portanto, o mais desfavorável para essa categoria de impacto.

Observa-se, também, que do cenário CEN 1BASE para o cenário CEN 2TOT, no qual a única alteração foi o aumento da quantidade de resíduos seletivos reciclados, há uma redução em torno de 48% da emissão de gases, chegando a uma redução de 96% no cenário CEN 3CTRAS, com a melhoria da separação dos resíduos na fonte geradora.

Os demais cenários, CEN 4TRCAS, CEN 5TRDAS e CEN 6TRIAS, apresentaram o melhor desempenho, com a menor emissão de gases, a destacar

a menor emissão de CO₂ eq./ano (equivalente/ano), que provém, principalmente, da decomposição anaeróbica da matéria orgânica. Lembrando que, nesses cenários, houve redução de material disposto em aterro sanitário.

Para melhor evidenciar os resultados nessa categoria, na Tabela 5 são apresentadas as emissões por etapa dos cenários avaliados.

Os resultados, conforme Tabela 5, apontam que a etapa que mais contribuiu com emissões de substâncias para a atmosfera, em todos os cenários, foi o aterro sanitário, resultado verificado também por Turner *et al.* (2016). A reciclagem, cujo valor resultante foi negativo, indicando que a massa deixou de ser disposta no ambiente, foi a etapa que mais contribuiu para reduzir emissões, pois evita a retirada de novas matérias-primas do ambiente com a geração de produtos a partir dos resíduos.

Categoria formação de foto-oxidantes

Considerando o balanço total de FoFO, verifica-se na Figura 2 que os cenários CEN 4TRCAS e CEN 5TRDAS apresentaram a maior redução

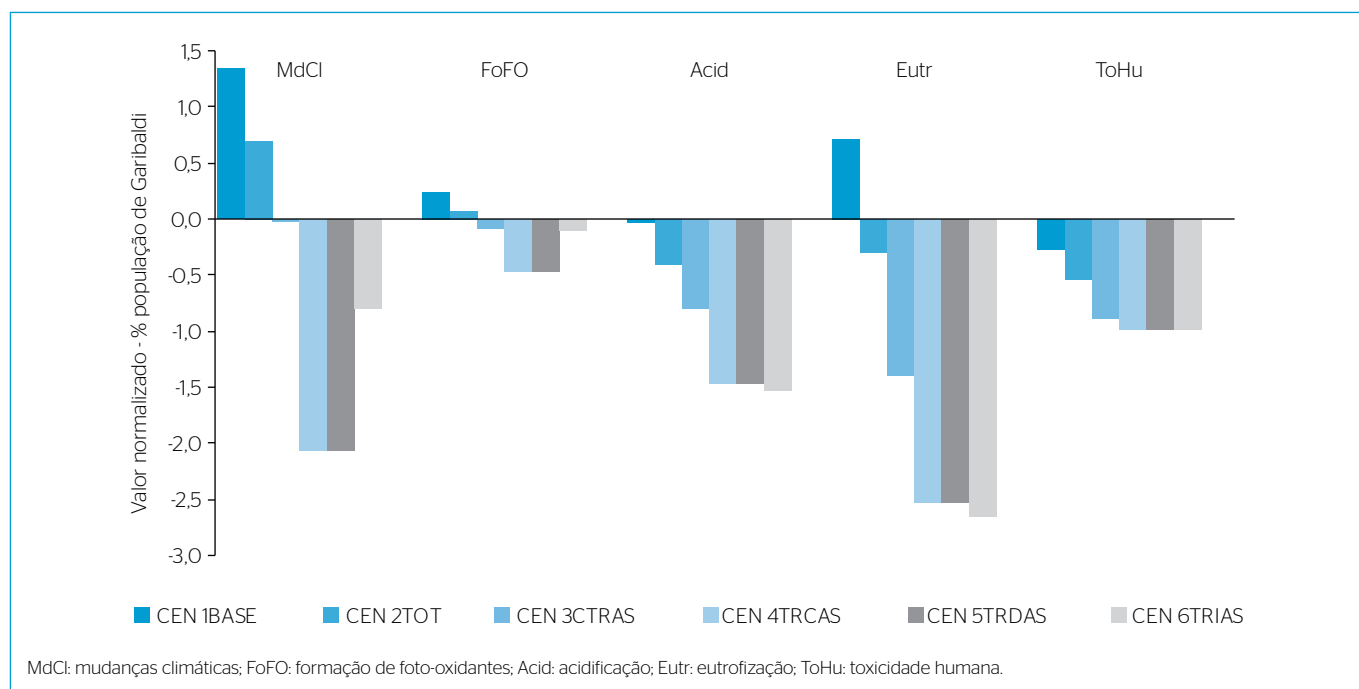


Figura 2 - Resultado das categorias de impacto ambiental para cada cenário avaliado expresso em equivalente populacional (%).

Tabela 5 - Emissões na categoria mudanças climáticas por etapa.

Cenários	Etapas (kg CO ₂ eq./ano)						
	Coleta	Triagem	Tratamento biológico	Tratamento térmico	Aterro	Reciclagem	Total
CEN 1BASE	346.709,59	546,52	-	-	3.703.356,73	-1.086.478,00	2.964.134,84
CEN 2TOT	313.470,85	546,52	-	-	3.311.568,60	-2.075.295,62	1.550.290,35
CEN 3CTRAS	332.998,07	846,02	-	-	2.706.017,86	-3.149.386,40	-109.524,46
CEN 4TRCAS	332.998,07	846,02	6.405,81	-	263.798,90	-5.230.151,73	-4.626.102,93
CEN 5TRDAS	332.998,07	846,02	-6.701,22	-	257.688,98	-5.222.858,79	-4.638.026,95
CEN 6TRIAS	332.998,07	846,02	15.271,52	3.084.690,11	11.095,27	-5.235.003,01	-1.790.102,02

na emissão dos poluentes; ou seja, apresentaram o menor impacto ambiental. O resultado deve-se à menor quantidade de resíduos disposta em aterro, uma vez que, no cenário 4, adota-se a compostagem como forma de tratamento da matéria orgânica putrescível e, no cenário 5, a digestão anaeróbia, além da reciclagem de resíduos seletivos em ambos.

Observa-se que, nos cenários CEN 3CTRAS (em que há a maior quantidade de resíduos seletivos reciclados) e CEN 5TRIAS (em que se adota a incineração), o benefício ambiental ficou próximo, apresentando um melhor desempenho em relação aos cenários CEN 1BASE e CEN 2TOT, que apresentam a maior quantidade de material disposto em aterro. Os resultados por etapa dos cenários avaliados nessa categoria de impacto são apresentados na Tabela 6.

De acordo com os resultados, verifica-se a formação de foto-oxidantes principalmente na etapa de coleta, na qual pode ocorrer a formação de compostos voláteis devido à queima incompleta e à evaporação de combustíveis. Assim, a etapa de coleta apresentou a maior emissão de gases poluentes (valores positivos) e a etapa de reciclagem o melhor desempenho (valores negativos). No balanço geral, os cenários CEN 4TRCAS e CEN 5TRDAS apresentaram o melhor desempenho ambiental.

Categoria acidificação

De acordo com os gases avaliados nessa categoria, observou-se que valores se revelaram negativos em todos os cenários. Verificou-se o menor impacto ambiental nos cenários CEN 4TRCAS, CEN 5TRDAS e CEN 6TRIAS, nos quais, além da reciclagem de resíduos seletivos,

adotaram-se os processos de compostagem, digestão anaeróbia e incineração, respectivamente.

Destaca-se a alteração de valores do CEN 1BASE para o CEN 3CTRAS, em que a proposta para o cenário foi a melhoria nas etapas de coleta e triagem, sem inserir novos tratamentos no sistema de gerenciamento, fomentando assim a reciclagem. O resultado refletiu diretamente no desempenho ambiental, com a redução na emissão de gases com potencial de acidificação.

Na Tabela 7 estão expressos os valores das emissões em todos os cenários e em cada etapa do sistema de gerenciamento de resíduos para a categoria de impacto.

Observou-se que, embora em menor escala, a etapa de triagem também aparece com valores positivos ao indicador, apontando, principalmente, o consumo de energia. De um modo geral, nessa categoria de impacto a reciclagem foi a etapa que mais contribuiu para a redução da emissão de substâncias para a atmosfera (valores negativos), e a etapa de coleta foi a etapa que apresentou o maior potencial de emissões (valores positivos).

Categoria eutrofização

De acordo com os resultados, o cenário CEN 1BASE foi o que apresentou o maior potencial de Eutr, sendo que os demais cenários apresentaram contribuição negativa, ou seja, ocorreu benefício ambiental.

O cenário que apresentou o menor potencial de Eutr foi o CEN 6TRIAS, no qual os resíduos são encaminhados para a reciclagem

Tabela 6 - Emissões na categoria formação de foto-oxidantes por etapa.

Cenários	Etapas (kg C ₂ H ₄ eq./ano)						
	Coleta	Triagem	Tratamento biológico	Tratamento térmico	Aterro	Reciclagem	Total
CEN 1BASE	246,76	0,11	-	-	717,38	-352,58	611,67
CEN 2TOT	223,10	0,11	-	-	640,24	-673,47	189,99
CEN 3CTRAS	237,00	0,18	-	-	524,34	-1026,35	-264,84
CEN 4TRCAS	237,00	0,18	1,32	-	80,28	-1594,51	-1.281,60
CEN 5TRDAS	237,00	0,18	-1,13	-	79,05	-1593,52	-1.278,43
CEN 6TRIAS	213,57	0,07	6,22	-0,14	7,10	-544,36	-317,55

Tabela 7 - Emissões na categoria acidificação por etapa.

Cenários	Etapas (kg SO ₂ eq./ano)						
	Coleta	Triagem	Tratamento biológico	Tratamento térmico	Aterro	Reciclagem	Total
CEN 1BASE	3.542,69	2,01	-	-	1.921,49	-6.398,20	-932,01
CEN 2TOT	3.203,05	2,01	-	-	1.694,85	-12.221,28	-7321,37
CEN 3CTRAS	3.402,58	3,12	-	-	1.406,85	-18.972,43	-14.159,87
CEN 4TRCAS	3.402,58	3,12	23,38	-	683,66	-29.791,09	-25.678,34
CEN 5TRDAS	3.402,58	3,12	-19,35	-	679,74	-29.763,78	-25.697,68
CEN 6TRIAS	3.402,58	3,12	113,97	-174,36	113,15	-29.802,18	-26.343,72

(seletivos) e para a compostagem (matéria orgânica putrescível), e o rejeito para incineração; conseqüentemente, é menor a quantidade de material disposto em aterro sanitário. Lembrando que a decomposição da massa de resíduos no aterro sanitário gera líquidos (lixiviado) e gases, influenciando diretamente na categoria de impacto Eutr. Na Tabela 8 encontram-se os valores das emissões nessa categoria.

Os valores sustentam que a etapa de reciclagem, novamente, contribuiu para minimizar os impactos ambientais nos cenários avaliados.

Categoria toxicidade humana

De acordo com os resultados observados na Figura 2, os cenários CEN 4TRCAS, CEN 5TRDAS e CEN 6TRIAS foram os que apresentaram os valores mais negativos, representando um maior benefício ambiental em relação aos demais. Destaca-se que o indicador toxicidade compreende o impacto negativo sobre o meio ambiente. Os resultados das emissões da ToHu para todos os cenários avaliados por etapa estão apresentados na Tabela 9.

Com base na Tabela 9, observou-se que a reciclagem dos resíduos influencia diretamente no resultado global de avaliação dessa categoria em cada cenário, uma vez que, quanto maior a quantidade de resíduos efetivamente reciclados, menor é o impacto ambiental.

Segundo observado por Alencar (2013), a reciclagem e a compostagem proporcionam maiores ganhos ambientais, uma vez que a conversão da matéria orgânica que seria destinada para aterro contribui

para a redução de emissões, levando à redução no potencial de ToHu associada ao processo.

Indicadores ambientais: uso de energia e disposição de resíduos em aterro

Na Figura 3, é apresentado o resultado comparativo do indicador uso de energia nos cenários avaliados, expresso em Gigajoule de energia equivalente ano (GJ eq./ano).

Os resultados apontam valores negativos para esse indicador em todos os cenários avaliados. Isso ocorre, fundamentalmente, em função da economia de energia na etapa de reciclagem, indicando, no balanço geral, que essa economia é superior à energia consumida. Destacam-se os cenários CEN 5TRDAS e CEN 6TRIAS, em que, além da reciclagem, ocorre geração de energia a partir dos processos de digestão anaeróbia e incineração.

Na Figura 4 são apresentados os resultados dos indicadores de disposição de resíduos sólidos “secos” (DRecAS) e disposição de resíduos sólidos “orgânicos” (DOrgAS).

Comparando os resultados dos indicadores, observou-se que o cenário CEN 1BASE apresentou a maior quantidade de resíduos seletivos potencialmente recicláveis dispostos em aterro sanitário, diminuindo gradativamente nos demais cenários avaliados, chegando a uma porcentagem mínima (0,1%) no CEN 6 TRIAS, no qual foi disposto em aterro somente o rejeito da etapa de incineração.

Nos resultados para o indicador DOrgAS, verificou-se que, nos cenários CEN 1BASE, CEN 2TOT e CEN 3CTRAS, ocorreu a disposição de

Tabela 8 - Emissões na categoria eutrofização por etapa.

Cenários	Etapas (kg PO ₄ eq./ano)						
	Coleta	Triagem	Tratamento biológico	Tratamento térmico	Aterro	Reciclagem	Total
CEN 1BASE	789,40	0,18	-	-	428,57	-695,45	522,69
CEN 2TOT	713,72	0,18	-	-	378,02	-1.328,40	-236,47
CEN 3CTRAS	758,18	0,27	-	-	313,79	-2.119,89	-1.047,64
CEN 4TRCAS	758,18	0,27	16,42	-	152,41	-2.809,87	-1.882,59
CEN 5TRDAS	758,18	0,27	19,08	-	151,54	-2.805,79	-1.876,71
CEN 6TRIAS	758,18	0,27	36,61	-4,20	25,20	-2.810,87	-1.994,80

Tabela 9 - Emissões na categoria toxicidade humana por etapa.

Cenários	Etapas (kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq./ano)						
	Coleta	Triagem	Tratamento biológico	Tratamento térmico	Aterro	Reciclagem	Total
CEN 1BASE	7.345,89	57,38	-	-	14.330,79	-835.476,43	-813.742,36
CEN 2TOT	6.641,65	57,38	-	-	12.679,44	-1.595.852,32	-1.576.473,85
CEN 3CTRAS	7.055,38	94,28	-	-	10.386,44	-2.588.370,75	-2.570.834,58
CEN 4TRCAS	7.055,38	88,84	666,34	-	1.989,68	-2.844.915,76	-2.835.115,53
CEN 5TRDAS	7.055,38	88,84	-697,09	-	1.966,32	-2.844.896,16	-2.836.482,71
CEN 6TRIAS	7.055,38	88,84	854,18	5698,33	262,32	-2.845.274,86	-2.831.315,82

100% da matéria orgânica potencialmente reciclável em aterro sanitário. Nos cenários CEN 4TRCAS (com compostagem), CEN 5TRDAS (com digestão anaeróbia) e CEN 6TRIAS (com compostagem e incineração de rejeitos), ocorreu uma diminuição gradativa de resíduos dispostos em aterro sanitário, chegando a 0,0% no cenário 6.

Elaborando um panorama comparativo quanto à destinação final dos resíduos, em porcentagem de massa recuperada ou reciclada por cenário avaliado, obteve-se como resultado o apresentado na Figura 5. Nesta, a massa recuperada na forma de combustão ou biodegradação expressa as saídas do sistema na forma de gases, como o CO₂, água (vapor d'água) e composto, como no caso da compostagem e da digestão anaeróbia. Na incineração, as saídas constituem-se de gases e cinzas. O material

recuperado indica o resíduo efetivamente reciclado (seletivos, compostos ou ferrosos removidos das cinzas do processo de incineração).

Comparando a destinação final dos resíduos, em cada cenário, observou-se que o CEN 1BASE foi o que apresentou o menor índice de recuperação. Nos cenários CEN 2TOT e CEN 3CTRAS o índice de recuperação aumentou, devido às melhorias na separação e na triagem dos resíduos. No CEN 4TRCAS, a massa foi recuperada por meio da reciclagem e da compostagem. No CEN 5TRDAS, a reciclagem associada à digestão anaeróbia, seguida de compostagem, chegou a recuperar um total de 68%. O cenário CEN 6TRIAS foi o que apresentou o melhor desempenho em recuperação de massa de resíduos, com a reciclagem, a compostagem e a incineração, dispondo somente 6% do total coletado em aterro sanitário.

De modo geral, os cenários apresentaram uma redução gradativa de massa de resíduos disposta em aterro sanitário, à medida que aumentou a quantidade de material recuperado. Considerando a heterogeneidade na composição dos resíduos, a utilização de processos de tratamento integrados possibilita a reintrodução de uma maior quantidade de material aos ciclos produtivos e, conseqüentemente, um menor impacto ambiental, conforme observado também por Song *et al.* (2013) e Li *et al.* (2015).

A reciclagem predominou, em todos os modelos avaliados, como a prática que mais contribuiu para minimizar, ou não gerar, impactos ambientais. Esse resultado também foi apontado por Buttol *et al.* (2007) e por Reichert e Mendes (2014).

Lima *et al.* (2014), em estudo para propor alternativas tecnológicas de tratamento de RSU na região sul do Brasil, considerando um arranjo simplificado, sugerem a rota tecnológica da reciclagem, compostagem

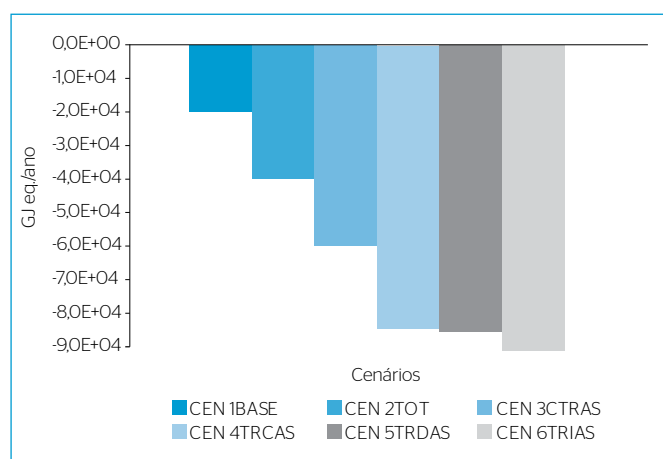


Figura 3 - Resultados do indicador uso de energia.

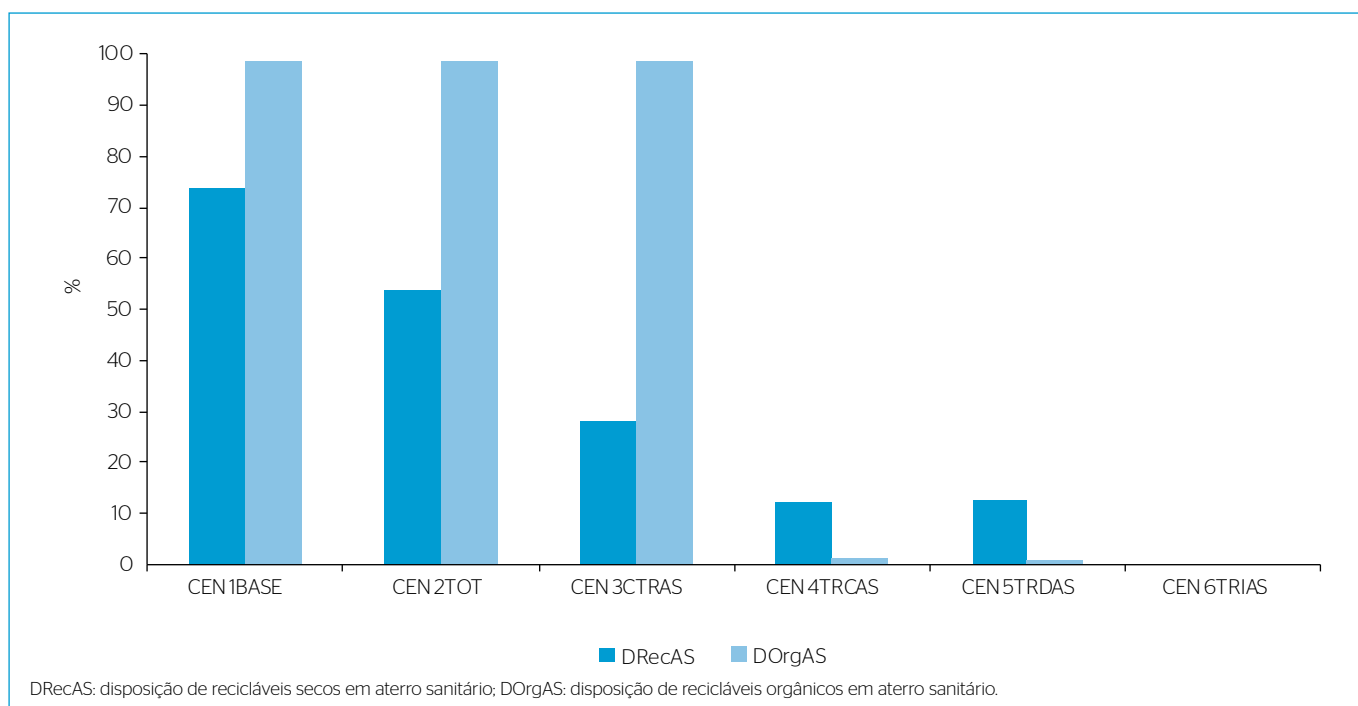


Figura 4 - Resultados dos indicadores de recicláveis dispostos em aterro sanitário e de orgânicos dispostos em aterro sanitário.

e aterro sanitário sem geração de energia para os municípios de porte intermediário (com menos de 250 mil habitantes). Conforme observado na presente pesquisa, o arranjo de diferentes alternativas tecnológicas possibilita maior reciclagem da massa de resíduos com menor impacto ambiental.

A reciclagem e a questão energética são fundamentais para obtenção de menores impactos ambientais em avaliação de cenários de gerenciamento de RSU (BUTTOL *et al.*, 2007; RIPA *et al.*, 2017; BELBOOM *et al.*, 2013). O retorno da matéria ao ambiente, na forma recuperada (produtos), ou por combustão ou biodegradação (gases, água), reduziu o potencial de impacto ambiental nos cenários avaliados, conforme revelado nas categorias e indicadores e de acordo com o sistema de gerenciamento adotado, voltando assim ao ciclo de vida.

CONCLUSÕES

O sistema atual de gerenciamento de resíduos do município (cenário base) apresentou o maior potencial de impacto ambiental. Os cenários com diferentes técnicas de tratamento associadas apresentaram menor impacto ambiental.

A separação dos resíduos na origem e a coleta seletiva apresentaram-se como mecanismos fundamentais para a implementação dos processos tecnológicos de tratamento e de reciclagem, evitando a contaminação do material por outros componentes presentes nos resíduos, de forma que cenários com maiores índices de reciclagem resultam em menores impactos ambientais ao longo do ciclo de vida e, principalmente, em economia de energia.

As alternativas de tratamento — como a compostagem, digestão anaeróbia e incineração — possibilitam progredir com a reciclagem dos resíduos sólidos “secos”, servindo como meios para alcançar a disposição final somente de rejeitos em aterro sanitário, atendendo à PNRS.

Como limitações da ACV, verificam-se a disponibilidade e a qualidade dos dados necessários para o estudo, pois é fundamental para a confiabilidade e representatividade dos resultados. Também destaca-se a ausência de dimensões espaciais e temporais das informações utilizadas para avaliar o impacto, o que pode gerar incertezas nos resultados.

Tais conclusões, a partir dos resultados da ACV, podem servir de apoio aos gestores para a tomada de decisão frente às diferentes opções tecnológicas de tratamento de RSU. Sob o aspecto ambiental,

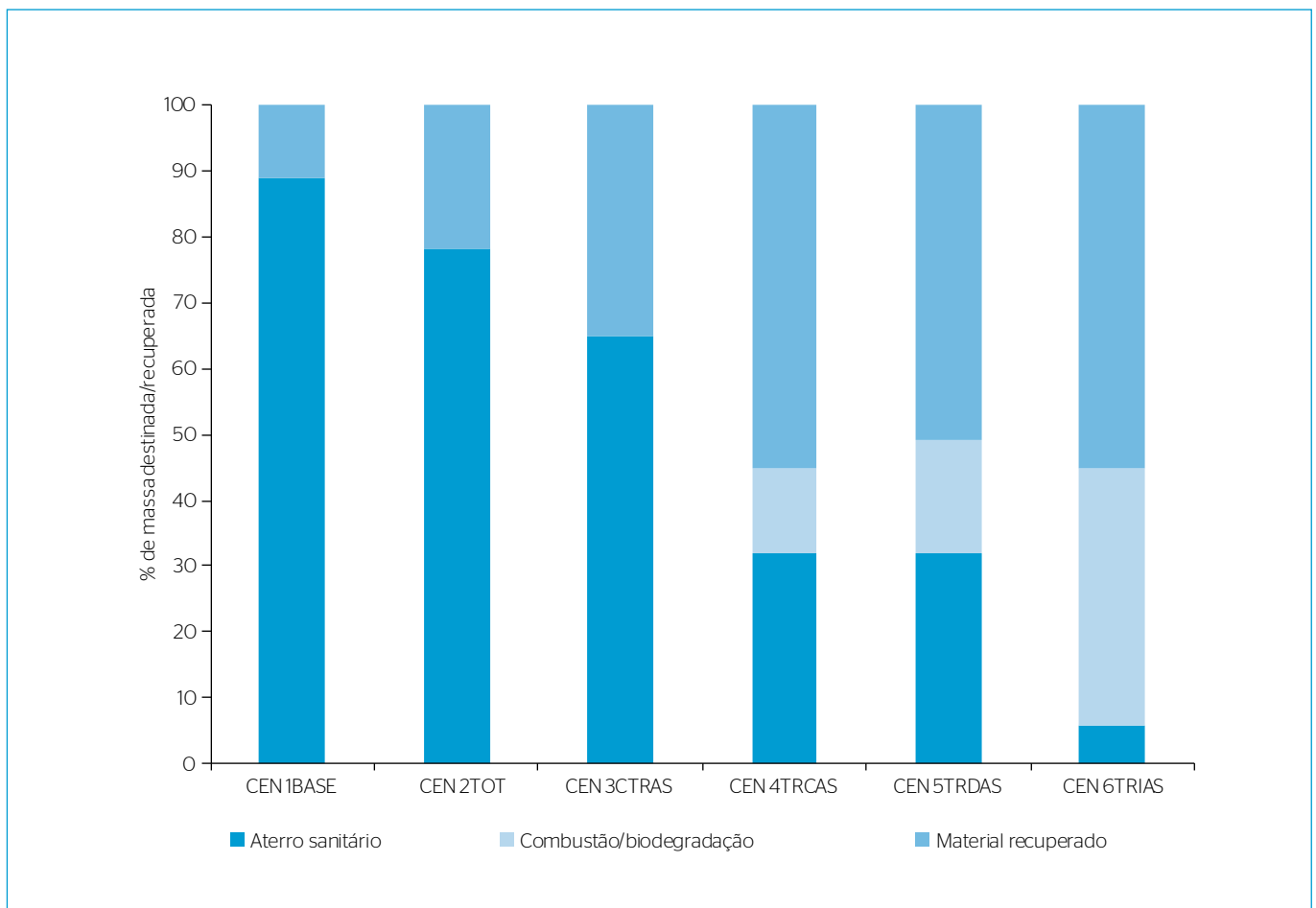


Figura 5 - Resultado comparativo da destinação final de massa de resíduos nos cenários.

recomenda-se escolher o sistema que apresenta a menor carga ou impacto ambiental. Sugere-se, ainda, para a tomada de decisão, envolver outros critérios como o econômico e o social, comparando os benefícios dos diferentes sistemas de gerenciamento de resíduos quanto às cargas ambientais, os custos econômicos e a aceitabilidade social, sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Assim, pode-se concluir que a aplicação da técnica de ACV por meio da simulação de cenários futuros permite orientar quanto às medidas a serem adotadas para o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Os resultados não indicam a melhor

tecnologia para o gerenciamento dos RSU, mas apontam os processos que podem, de forma integrada, causar menos dano ao meio ambiente. Desse modo, este estudo demonstrou que, para o município de Garibaldi, as rotas tecnológicas que contemplaram a reciclagem associada à compostagem (CEN 4), a reciclagem associada à digestão anaeróbica seguida por compostagem (CEN 5) e a reciclagem associada à compostagem com a incineração de rejeitos e com recuperação de energia (CEN 6) apresentaram o melhor desempenho sob o aspecto ambiental, indicando-os como possíveis soluções de tratamento dos RSU.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, J. C. (2013). *Diagnóstico e inventário de ciclo de vida do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos de Imperatriz-MA*. 94 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2001). *NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: NBR.
- BELBOOM, S.; DIGNEFFE, J.-M.; RENZONI, R.; GERMAIN, A.; LEONARD, A. (2013). Comparing technologies for municipal solid waste management using life cycle assessment methodology: a Belgian case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, p. 1513-1523.
- BRASIL. (2010). *Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Senado Federal.
- _____. (2016). Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos - 2014*. Brasília: Ministério das Cidades.
- BUTTOL, P.; MASONI, P.; BONOLI, A.; GOLDONI, S.; BELLADONNA, V.; CAVAZZUTI, C. (2007). LCA of integrated MSW management systems: Case study of the Bologna District. *Waste Management*, v. 27, p. 1059-1070.
- DEN BOER, E.; DEN BOER, J.; BERGER, J.; JAGER, J. (2005a). *Waste management planning and optimization*. Handbook of municipal waste prognosis and sustainability assessment of waste management systems. Stuttgart: Ibidem-Verlart. 306p.
- DEN BOER, E.; DEN BOER, J.; JAGER, J.; RODRIGO, J.; MENESES, M.; CASTELLS, J.; SCHANNE, L. (2005b). *Deliverable Report on D3.1 and D3.2: Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work package 3)*. Darmstadt: Technische Universitaet Darmstadt. 198p.
- DMITRIJEVAS, C. (2010). *Análise de Ecoeficiência de Técnicas para tratamento e disposição de resíduos sólidos urbanos*. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Nuclear, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FERREIRA, A. B. H. (2008). *Miniaurélio: o minidicionário da língua portuguesa*. 7. ed. Curitiba: Positivo.
- GUINÉE, J. B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. (2001). *Handbook on life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 692p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2013). *Cidades: Rio Grande do Sul - Garibaldi*. Rio de Janeiro: IBGE.
- JUCÁ, J. F. T.; LIMA, J. D.; MARIANO, M. O. H.; FIRMO, A. L. B.; LIMA, D. G. A.; LUCENA, L. F. L.; FARIAS, P. R. R.; JUNIOR, F. H. C.; CARVALHO, E. H.; FERREIRA, J. A.; REICHERT, G. A. (2014). *Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. Jaboatão dos Guararapes: Grupo de Resíduos Sólidos - UFPE.
- LI, H.; NITIVATTANANON, V.; LI, PENG. (2015). Developing a sustainability assessment model to analyse China's municipal solid waste management enhancement strategy. *Sustainability*, v. 7, p. 1116-1141.
- LIMA, J. D. (2000). *Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil*. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental Seção Paraíba. 267p.
- _____. (2012). *Modelos de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil*. 435 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

- LIMA, J. D. de; JUCÁ, J. F. T.; REICHERT, G. A.; FIRMO, A. L. B. (2014). Uso de modelo de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região Sul do Brasil. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p. 33-42.
- MASSUKADO, L. M. (2004). *Sistema de apoio à decisão: avaliação de cenários de gestão integrada de resíduos sólidos domiciliares urbanos*. 272 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- MCDougall, F. R.; WHAITE, P.; FRANKE, M.; HINDLE, P. (2004). *Gestión Integral de Resíduos Sólidos: inventario de ciclo de vida*. Caracas: Procter & Gamble. 620p.
- MCDougall, F. R.; WHITE, P.; FRANKE, M.; HINDLE, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*. 2. ed. Oxford: Blackell Science LTDA. 513p.
- MOURA, A. M. M.; ROMA, J. C.; SACCARO JUNIOR, N. L. (2016). Problemas econômicos, soluções ambientais. *Boletim Regional Urbano e Ambiental*, Brasília, p. 33-43.
- MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. (2002). *Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações*. Campinas: CETEA/CEMPRE. 92p.
- PAVAN, M. C. O. (2010). *Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil*. 187 f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PESSIN, N.; SILVA, A. R.; DE CONTO, S. M.; PANATOTTO, T. P.; BEAL, L. L. (2002). Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. *Alternativas de Disposição de Resíduos sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades*. Rio de Janeiro: ABES. (Coletânea de Trabalhos Técnicos). p. 13-17.
- REICHERT, G. A. (2013). *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. 301 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. (2014). Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 301-313.
- RIPA, M.; FIORENTINO, G.; VACCA, V.; ULGIATI, S. (2017). The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 445-460.
- SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. (2013). Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau. *Journal of Cleaner Production*, v. 57, p. 92-100.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. (1993). *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. Boston: McGraw-Hill. 978p.
- TENORIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. (2004). Controle Ambiental de Resíduos. In: PHILIPPI JR., A.; ROMERO, M. A.; BRUNA, G. C. *Curso de Gestão Ambiental*. Barueri: Manole. p. 155-211.
- TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S. (2016). Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making. *Journal of Cleaner Production*, v. 129, p. 234-248.
- XARÁ, S.; SILVA, M.; ALMEIDA, M. F.; COSTA, C. (2001). *A aplicação da análise do ciclo de vida no planejamento da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos*. Repositório Institucional, Universidade Católica Portuguesa, Porto.