

## DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE TRÊS CACHOEIRAS - RS

Deivis Machado Mengue<sup>1\*</sup>, Adan William da Silva Trentin<sup>2</sup>, Adriane Lawisch Rodriguez<sup>2</sup>, Diosnel Antonio Rodriguez Lopez<sup>2</sup>, Tiago Bender Wermuth<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engenharia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), CEP: 96815-900, Rio Grande do Sul do Sul, Brasil.

<sup>2</sup>Mestrado em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), 2293, CEP: 96815-900, Rio Grande do Sul, Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Materiais (PPGE3M), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), CEP: 90035190, Rio Grande do Sul, Brasil.

\*E-mail: [deivis\\_mengue@hotmail.com](mailto:deivis_mengue@hotmail.com)

Recebido em: 26/03/15

Aceito em: 03/06/15

### RESUMO

A tomada de decisões na área de gerenciamento de resíduos sólidos tem se mostrado como um dos principais desafios aos gestores públicos. A utilização de ferramentas que auxiliem na obtenção das melhores decisões, permitindo economia de recursos financeiros, juntamente com a minimização dos impactos ao meio ambiente, assume grande importância. O presente trabalho apresenta um estudo diagnóstico do gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos no município de Três Cachoeiras (RS) por meio da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida, utilizou-se o programa computacional *Integrated Waste Management (IWM) – 2, Versão 2.5*. Para converter os valores obtidos na ACV em impactos ambientais, foram realizadas simulações com base nos fatores de caracterização utilizados pelo programa computacional *SimaPro® da Pré Consultants* e publicados no relatório ReCiPe 2008, versão 1.08. Foram realizadas as Avaliações do Ciclo de Vida do cenário atual de gerenciamento dos resíduos e de mais três cenários de gerenciamento. Os resultados revelam que a disposição final dos resíduos em aterro controlado é a etapa com maiores contribuições para impactos ambientais. O cenário 4, composto pelas etapas de coleta, transporte, triagem dos resíduos sólidos urbanos passíveis de reciclagem, triagem da matéria orgânica e aterro sanitário, apresenta os menores índices de contribuição para impactos ambientais, revelando uma redução de 89% no potencial de aquecimento global, 20,1% no potencial de acidificação, 39,4% no potencial de eutrofização, 82,3% no potencial de depleção da camada de ozônio, 42,7% no potencial de toxicidade humana referente às emissões atmosféricas e 48,5% na redução do volume dos resíduos no aterro sanitário.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida. Impactos Ambientais. Resíduos Sólidos Urbanos.

### 1 Introdução

A geração de resíduos sólidos urbanos têm aumentado de forma significativa, em especial nas últimas duas décadas. Frente a isso, fica evidente a necessidade do correto gerenciamento desses resíduos, a fim de evitar problemas à saúde pública e impactos ao meio ambiente.

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos deve ser integrado, ou seja, deve englobar etapas articuladas entre si, desde a não geração até a disposição final, com atividades compatíveis com as dos demais sistemas de saneamento ambiental. Para isso, torna-se essencial a participação ativa e cooperativa do primeiro, segundo e terceiro setor, respectivamente, isto é, do governo, da iniciativa privada e da sociedade civil organizada [1].

McDougall e colaboradores [2] afirmam que um sistema de gestão de resíduos sólidos deve ser: ambientalmente eficiente,

isto é, reduzir ao máximo os resíduos gerados, bem como as emissões gasosas e líquidas; economicamente suportável, ou seja, operar a custos que possam ser suportados por toda a sociedade; e, socialmente aceito, isto é, operar de modo a ser aceito pela maior parte da comunidade, levando em conta a educação e o desenvolvimento.

No Brasil, constitucionalmente, é de competência do poder público local o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos produzidos em suas cidades. Os serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos compreendem a coleta, a limpeza pública, bem como a destinação final desses resíduos. Esses serviços exercem um forte impacto no orçamento das administrações municipais, podendo atingir 20,0% dos gastos da municipalidade [3].

A aprovação da Lei nº. 12.305/2010 e a sua regulamentação através do Decreto nº. 7.404/2010 trouxeram os princípios, os objetivos e as principais diretrizes da Política

Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os quais se mostram fundamentais para o adequado gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos [4].

Diferentes formas de tratamento e de destinação final dos resíduos sólidos urbanos são impulsionadas pela PNRS, sendo que os aterros sanitários são uma dessas alternativas. Khoo [5] expõe que os aterros sanitários devem ser considerados como a última opção para o gerenciamento, uma vez que não permitem a recuperação e o reaproveitamento dos resíduos. É importante ressaltar que a ordem de prioridade dos resíduos sólidos urbanos, definida pela PNRS é: não geração; redução; reutilização; reciclagem; tratamento; e, por fim, a disposição final adequada [4].

Reichert [6] afirma que no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, dependendo das diferentes alternativas e técnicas utilizadas para manejar, transportar, processar, tratar e dispor os resíduos, tem-se um potencial de geração de impactos ambientais resultantes das emissões gasosas, líquidas e resíduos finais das diversas etapas do sistema de manejo.

Na busca de novas alternativas para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, é necessário que se realize um levantamento dos impactos ambientais relacionados. Objetivando esse conhecimento, a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida tem ganhado destaque, uma vez que permite a quantificação e a análise dos impactos ambientais provocados por um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Motivado pelas atuais mudanças no cenário de gestão dos RSU no Brasil, em especial pela introdução da Lei nº. 12.305/2010 [4], este estudo objetiva a realização de um diagnóstico do sistema de gerenciamento integrado de resíduos sólidos do município de Três Cachoeiras – RS, por meio da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Local de estudo

O estudo de caso foi realizado no município de Três Cachoeiras, situado no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. O município possui uma área total de 251,058 km<sup>2</sup>, localizando-se na latitude 29°27'20" sul e longitude 49°55'28" oeste e conta com uma população de 10.217 habitantes, com densidade demográfica de 40,70 hab./km<sup>2</sup> [7].

### 2.2. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município foi realizada através da técnica de quarteamento, conforme a NBR 10.007/04 [8], em local autorizado pela empresa responsável pelo aterro controlado.

A caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município foi realizada no mês de fevereiro de 2014. Recolheu-se uma amostra de aproximadamente 1,00 m<sup>3</sup> e fez-se a abertura das sacolas para a separação dos resíduos conforme o manual de

gerenciamento de resíduos sólidos [9]. Trabalhou-se com uma massa de 111,8 kg de resíduos, sendo efetuada apenas uma amostragem, em função da autorização concedida pelos responsáveis. O caminhão responsável pela coleta dos resíduos sólidos urbanos no município realizou a disposição temporária dos mesmos no local designado, iniciando-se assim o processo de amostragem, no qual utilizaram-se equipamentos de proteção individual, ferramentas manuais, instrumento de mensuração e recipientes de coleta. Na figura 1 é possível visualizar o processo de separação dos materiais em função das suas características.

A partir da amostra obtida, iniciou-se a separação manual dos componentes, dividindo-os em sete grupos: papel, vidro, metal, plástico, matéria orgânica, rejeito e outros (pilhas, baterias, seringas, etc).



Figura 1: Disposição dos resíduos sólidos urbanos para etapa de composição gravimétrica.

### 2.3 Definição de escopo e unidade funcional

O escopo deste trabalho considera as atividades necessárias para gerir os resíduos sólidos urbanos a partir do momento em que são gerados e enviados para a coleta até a disposição final. Sendo assim, as etapas de geração, transporte, armazenamento, tratamento e destinação final foram analisadas e quantificadas.

Em função da necessidade de se realizar uma avaliação apenas da realidade local do sistema de gerenciamento, contemplando-se as atividades condizentes com a própria região de estudo, optou-se em não se trabalhar com a logística que envolve o destino dos materiais reciclados.

A unidade funcional utilizada no presente trabalho é a da geração anual de resíduos sólidos urbanos para o município [10; 11]. Sendo assim, considerou-se o equivalente a 612,00 toneladas/ano de resíduos sólidos urbanos. As emissões, o consumo de energia e os materiais são baseados nessa unidade funcional. Realizou-se um inventário para cada cenário desenvolvido, sendo utilizado o auxílio do software IWM-2,

versão 2.5. As fronteiras do sistema estão delimitadas no fluxograma da figura 2.

#### 2.4 Cenários analisados

A partir da obtenção dos dados e de informações sobre o cenário atual de gerenciamento dos RSU no município, foram elaborados outros três cenários, que levaram em consideração as exigências estabelecidas pela Lei 12.305/2010 [4].

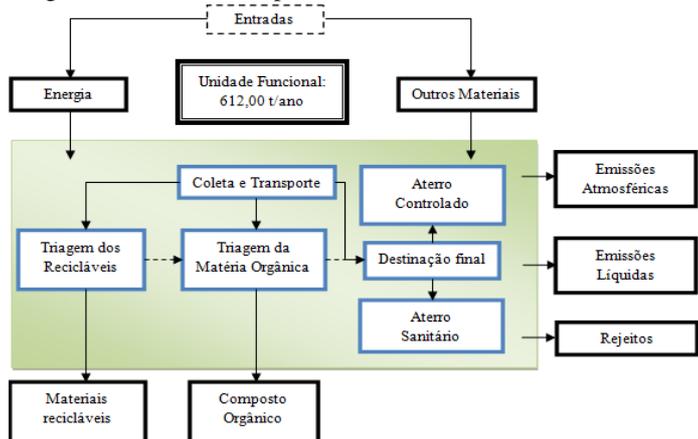


Figura 2: Limites e fronteiras do sistema

O cenário atual (1) engloba as etapas de coleta, transporte e destinação final dos RSU para aterro controlado, localizado no município de Terra de Areia – RS. Neste cenário, não há coleta seletiva nem triagem dos materiais passíveis de reciclagem ou da matéria orgânica, sendo que todo o montante de resíduos sólidos urbanos coletado é enviado diretamente à disposição final em local considerado ambientalmente inadequado [4].

No cenário 2, considerou-se o envio dos resíduos sólidos urbanos para um local ambientalmente adequado, conforme preconiza a Lei 12.305/2010 [4]. Foram contempladas as etapas de coleta, transporte e destinação final em aterro sanitário, com coleta de 90% do lixiviado, 70% de eficiência no tratamento do lixiviado e captura de 90% dos gases produzidos. Os gases capturados não sofrem aproveitamento energético, sendo apenas queimados.

O cenário 3 apresenta o acréscimo da etapa de triagem dos RSU passíveis de reciclagem. As taxas de reciclagem trabalhadas correspondem a:

- Papel: 50% (p/p).
- Plástico: 50% (p/p).
- Metais: 100% (p/p).
- Vidro: 100% (p/p).

Logo, o cenário 3 apresenta as etapas de coleta, transporte, triagem dos resíduos sólidos urbanos passíveis de

reciclagem e aterro sanitário. Os parâmetros são os mesmos do cenário 2, acrescentada a etapa de triagem dos resíduos.

O quarto e último cenário analisado considera as etapas de coleta, transporte, triagem dos resíduos sólidos urbanos passíveis de reciclagem, triagem da matéria orgânica e aterro sanitário, ou seja, esse cenário segue os mesmos parâmetros do cenário 3, sofrendo o acréscimo de um processo de compostagem de 50% da matéria orgânica presente na massa total de resíduos sólidos urbanos coletados.

#### 2.5 Avaliação do Ciclo de Vida: modelo utilizado

Para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida, em que todas as entradas e saídas do sistema foram identificadas e quantificadas, utilizou-se o programa computacional *Integrated Waste Management (IWM) – 2*, Versão 2.5 [2]. Esse programa computacional permite modelar as etapas de coleta, tratamento, compostagem, incineração, reciclagem e disposição final de resíduos sólidos. O modelo expressa valores ambientais do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos e compreende um parâmetro econômico paralelo. O mesmo auxilia os gestores municipais e industriais na tomada de decisões entre as várias opções de gerenciamento de resíduos.

Para converter os valores obtidos por meio da Avaliação de Ciclo de Vida em impactos ambientais, foram realizadas simulações com base nos fatores de caracterização de impacto utilizados pelo programa computacional *SimaPro® da Pré Consultants* e publicados no relatório ReCiPe 2008, versão 1.08.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Dados do diagnóstico do cenário atual

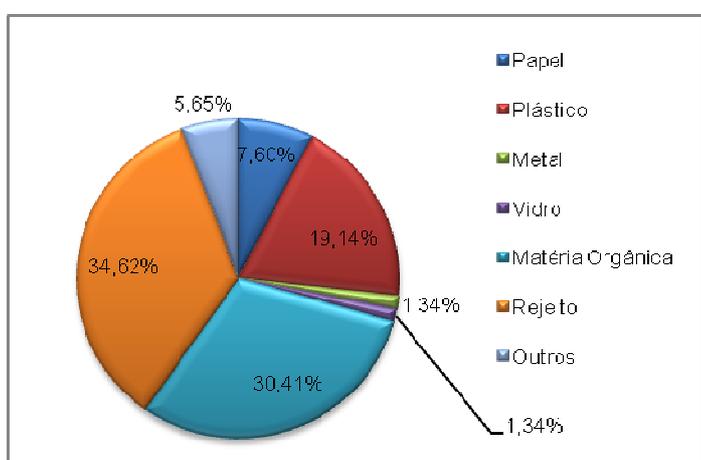
O atual sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Três Cachoeiras foi definido como cenário atual (1), em que os resíduos são acondicionados pela população, coletados e enviados para aterro controlado. A Secretária de Obras é a responsável pela coleta dos RSU, a qual atende 100% da população do município, onde é realizada apenas a coleta convencional. A geração *per capita* se encontra na faixa de 0,16 kg/habitante/dia.

A coleta é realizada por um caminhão do tipo compactador, modelo MB 1313, ano 1982, com autonomia de rodagem de 3,4 km para cada litro de diesel e capacidade de carga de 7 m<sup>3</sup>. O caminhão percorre diariamente 80 km para a etapa de coleta e 50 km para a destinação final no aterro controlado. Em função da capacidade de carga do caminhão, o mesmo realiza duas vezes por dia o itinerário de coleta e destinação final dos RSU. O município não conta com área de transbordo, ou seja, o mesmo caminhão que realiza a coleta é responsável pelo transporte até o destino final.

O aterro controlado, destino final dos resíduos sólidos urbanos do município, localiza-se no interior da cidade de Terra de Areia, sendo administrado por empresa privada. Segundo dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Três Cachoeiras, são enviadas 1,67 t/dia de RSU para o aterro controlado.

Conforme já descrito, realizou-se a atividade de composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos. A figura 3 apresenta os valores obtidos para cada componente analisado. Os dados obtidos mostram que o percentual de materiais recicláveis representa 29,42%, a matéria orgânica 30,41% e os rejeitos 34,62%.

Figura 3: Composição gravimétrica média dos RSU do município de Três Cachoeiras.



### 3.2 Análise de impacto ambiental dos cenários em estudo

Utilizou-se o programa computacional IWM-2, versão 2.5 [2], para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida, sendo que esta foi realizada para o cenário atual de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos e, também, para os três cenários simulados. Dados e informações relativas à quantidade e à composição dos resíduos sólidos urbanos, sistemas de coleta, separação dos resíduos, tratamento biológico e sobre o aterro sanitário foram analisados neste trabalho. Para o estudo, foi delimitado um horizonte temporal de 100 anos.

A partir da metodologia proposta, que atende às requisições da ISO 14.040 [12], adotaram-se os seguintes indicadores e categorias de impacto para avaliação:

- Indicador referente a “Uso de Energia” (GJ/ano);
- Indicador referente a “Resíduo Sólido Final” (t/ano);
- Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos (kg NMVOC eq./ano);
- Potencial de Aquecimento Global (kg CO<sub>2</sub> eq./ano);
- Potencial de Acidificação (kg SO<sub>2</sub> eq./ano);
- Potencial de Eutrofização (kg PO<sub>4</sub> eq./ano);

- Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC-11 eq./ano);
- Potencial de Formação de Material Particulado (kg PM10 eq./ano).

#### 3.2.1 Uso de energia

Este indicador engloba todos os valores de energia consumida, bem como valores de energia gerada no sistema de gerenciamento dos RSU. De acordo com Reichert [6], este representa o equivalente energético em GJ (Giga Joule) gasto em todo o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Os resultados sobre o uso de energia nos quatro cenários estudados são apresentados na figura 4, na qual valores negativos significam economia de energia ou energia que deixou de ser consumida.

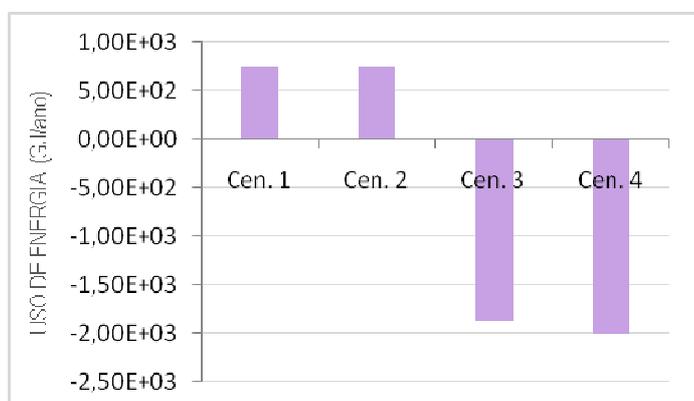


Figura 4: Uso de energia em cada um dos cenários analisados.

Os cenários 1 e 2 apresentaram consumo de energia muito semelhante, pois as distâncias percorridas nas etapas de coleta e disposição final foram as mesmas, consumindo 744 GJ/ano de energia. Já nos cenários 3 e 4, visualiza-se uma economia significativa de energia, principalmente pela introdução das etapas de triagem e reciclagem, em que há um ganho de energia de 2.001 GJ/ano, no cenário 4, e 1.878 GJ/ano, no cenário 3. A inclusão da etapa de compostagem da matéria orgânica no cenário 4 permitiu um grande ganho ambiental, devido à redução de material enviado ao aterro sanitário, com consequente aumento da vida útil do mesmo, redução do potencial de geração de gases odoríferos e da carga orgânica dos líquidos lixiviados nos aterros, eliminação de patógenos e a produção de um composto orgânico que melhora a estrutura do solo.

Em estudo realizado por Rodríguez-Iglesias e colaboradores [13], foram avaliadas diferentes situações de gerenciamento dos RSU, e o uso de energia ficou entre 33x10<sup>6</sup> GJ/ano e 48x10<sup>6</sup> GJ/ano. Neste mesmo estudo, os autores citam que a redução na geração de volumes sólidos proporciona um desconto de 30% no uso de energia e que a implementação da

compostagem apresenta os maiores níveis de uso de energia. Os autores ainda citam que a diminuição das distâncias até a estação de tratamento dos RSU não representa uma melhoria significativa no uso total de energia.

### 3.2.2 Resíduo sólido final

O indicador “resíduo sólido final” indica a quantidade de resíduo sólido final que tem como destino o aterro controlado, para o cenário atual, e o aterro sanitário para os demais cenários. Na figura 5 são expostos os valores referentes a cada um dos cenários analisados.

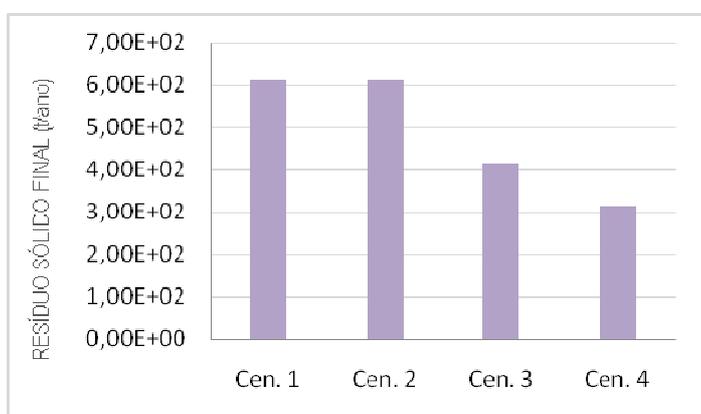


Figura 5: Resíduo sólido final enviado ao aterro sanitário.

É possível visualizar que os cenários 1 e 2 correspondem aos cenários que mais enviam resíduos para o aterro sanitário. O cenário 4 é o cenário com menor contribuição, pois a redução de resíduos enviados para aterramento chega a 48,5% quando comparado ao cenário atual.

### 3.2.3 Potencial de aquecimento global

A categoria de aquecimento global considera os parâmetros de CO<sub>2</sub> (fóssil e renovável), CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O medidos como CO<sub>2</sub> equivalente. Essas emissões ocorrem, principalmente, durante a decomposição do resíduo final. A figura 6 destaca a contribuição de impacto ambiental relacionado ao potencial de aquecimento global.

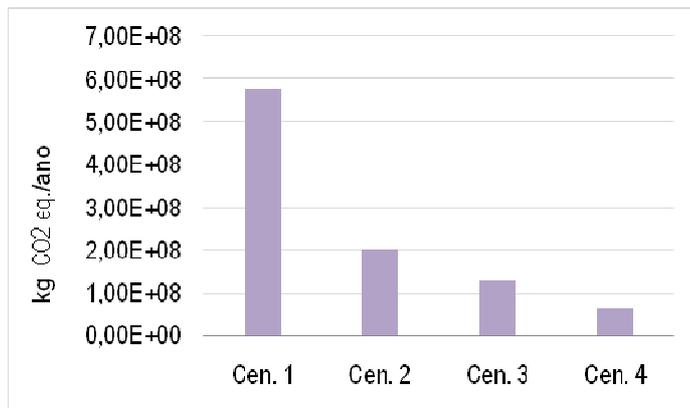


Figura 6: Contribuição de cada cenário para o potencial de aquecimento global.

O cenário atual (1) apresenta um potencial de aquecimento global de 576.796.786 kg equivalente de CO<sub>2</sub>/ano. Isso se deve ao fato de o aterro controlado não possuir coleta e tratamento dos gases produzidos. No cenário 2, a introdução de um aterro sanitário, como forma de disposição de resíduos, colabora para uma diminuição do potencial de aquecimento global em 65%, alcançando um valor de 201.636.032 kg equivalente de CO<sub>2</sub>/ano. A redução desse impacto é resultado de coleta e tratamento de 90% dos gases produzidos no aterro sanitário.

No cenário 3, o potencial de aquecimento global atinge um valor final de 127.023.570 kg equivalente de CO<sub>2</sub>/ano. A inclusão da triagem e reciclagem contribui para a redução em relação ao cenário 2. Comparando-se o cenário 3 com o cenário 1, o potencial de aquecimento global apresentou uma redução de 79%. O potencial de aquecimento global do cenário 4 alcança o valor de 61.826.729 kg equivalente de CO<sub>2</sub>/ano, apresentando uma redução de 89%, a maior em relação ao cenário atual (1). A razão para a redução é a introdução do processo de compostagem de parte da matéria orgânica, com consequente redução de material enviado para aterramento. Em um estudo realizado por Banar e colaboradores [14], evidenciou-se que o CH<sub>4</sub> é o principal impactante para a etapa de aterro sanitário.

A queima de combustíveis fósseis relacionada à coleta contribui com o valor de 43.121.647 kg equivalente de CO<sub>2</sub>/ano em todos os cenários simulados.

### 3.2.4 Potencial de acidificação

O indicador desta categoria é expresso em máxima liberação de prótons (H<sup>+</sup>), e o fator de caracterização é o potencial de acidificação de cada emissão (kg equivalente de SO<sub>2</sub>/kg de emissão). Rigamonti e colaboradores [15] relacionam o potencial de acidificação com as emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e amônia. Os resultados referentes ao potencial de acidificação estão expostos na figura 7.

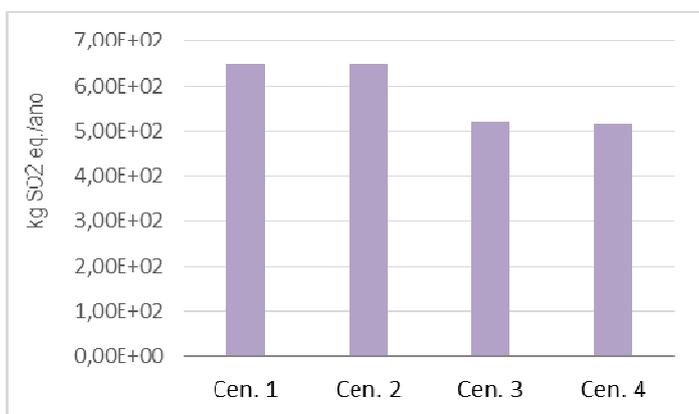


Figura 7: Contribuição de cada cenário para o potencial de acidificação.

O impacto ambiental relacionado ao cenário atual corresponde ao valor de 646,04 kg SO<sub>2</sub> equivalente/ano. Principalmente a queima incompleta de combustíveis fósseis relaciona-se com esse valor obtido.

O cenário 2 revelou um pequeno aumento no potencial de acidificação em comparação ao cenário atual. Esse aumento ocorre em função da queima incompleta de 90% dos gases do aterro sanitário. O valor do potencial de acidificação, no cenário 2, é de 647,48 kg de SO<sub>2</sub> equivalente ao ano. A inclusão de triagem e reciclagem, no cenário 3, colabora para uma redução de 19,6% no valor desse indicador em relação ao cenário 1. O valor do potencial de acidificação no cenário 3 é de 519,15 kg de SO<sub>2</sub> equivalente/ano. O cenário 4 apresenta um valor de potencial de acidificação muito próximo do cenário 3, na ordem de 516,13 kg de SO<sub>2</sub> equivalente/ano.

Özeler e colaboradores [16] verificaram, em um estudo realizado na cidade de Ankara, na Turquia, que os impactos ambientais relacionados à acidificação diminuem com o aumento da reciclagem dos materiais secos. Segundo Hong e colaboradores [17], a coleta e o envio dos resíduos diretamente ao aterro sanitário são responsáveis por -1,10 kg SO<sub>2</sub> equivalente/t de resíduo seco, e a introdução da compostagem para a matéria orgânica representa -0,30 kg de SO<sub>2</sub> equiv./t de resíduo seco.

### 3.2.5 Potencial de eutrofização

O potencial de impacto por eutrofização acontece, sobretudo, pela elevada concentração de nitratos e amônia no lixiviado de aterro, mesmo que este seja devidamente tratado em estação de tratamento [18]. Reichert [6] afirma que a eutrofização diz respeito aos impactos potenciais relacionados à concentração excessiva de macronutrientes, principalmente de nitrogênio e fósforo. Na figura 8, é possível visualizar as contribuições referentes à categoria potencial de eutrofização.

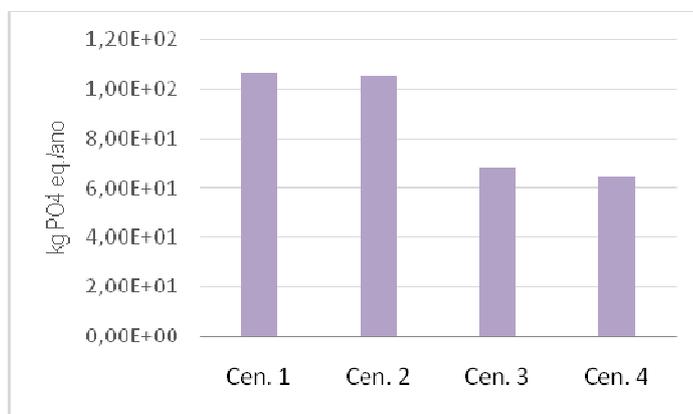


Figura 8: Contribuição de cada cenário para o potencial de eutrofização.

Os cenários 1 e 2 demonstram valores de impacto por potencial de eutrofização muito próximos, com 106,45 kg de PO<sub>4</sub> equivalente/ano e 105,60 kg de PO<sub>4</sub> equivalente/ano, respectivamente. Mesmo com a inclusão de aterro sanitário no cenário 2, os valores de potencial de eutrofização não apresentaram redução significativa. Isto pode ocorrer devido à queima incompleta dos gases produzidos pelo NO<sub>x</sub> gerado no aterro sanitário.

Os valores obtidos no cenário 3 demonstram claramente a importância da triagem e da reciclagem como formas de tratamento de resíduos. A redução dos valores de impacto por potencial de eutrofização do cenário 3 em relação ao cenário 1 é de 35,9%, com valor total de 68,28 kg PO<sub>4</sub> equivalente/ano. No cenário 4, a adição da compostagem como forma de tratamento do resíduo orgânico provocou a diminuição do valor do potencial de eutrofização em relação ao cenário 3, assumindo o valor de 64,49 kg de PO<sub>4</sub> equivalente/por ano, o que contribuiu na redução de 39,4% em relação ao cenário atual.

Bovea e Powell [19] realizaram um estudo em que foram consideradas as etapas de triagem, compostagem e recuperação energética no sistema de gerenciamento de resíduos na Comunidade de Valenciana (Espanha). A alteração no sistema permitiu que o impacto ambiental por eutrofização fosse totalmente evitado, gerando valores negativos em todos os cenários analisados.

### 3.2.6 Potencial de depleção da camada de ozônio

Conforme citado por Monteiro [20], a Organização Meteorológica Mundial (WMO) desenvolveu o modelo de caracterização utilizado para medir impactos dessa natureza e definiu o Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) para os mais diferentes gases em termos de kg CFC-11 equivalente/kg emissão. Kulay [21] cita que o uso de aerossóis a base de haletos orgânicos, como o clorofluorcarbono (CFC-11) e seus derivados são os principais agentes de depleção da camada

de ozônio. A figura 9 traz as contribuições referentes ao potencial de depleção da camada de ozônio.

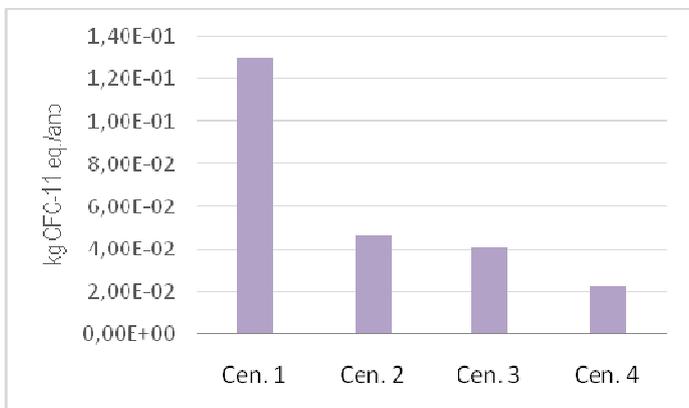


Figura 9: Contribuição de cada cenário para o potencial de eutrofização.

Conforme apresentado na figura 9, o cenário atual (1) é o cenário com maiores valores de emissões em relação ao potencial de depleção da camada de ozônio. A introdução do aterro sanitário como destinação final dos resíduos (cenário 2), representa uma redução de 63,8% no valor de emissão desse indicador. Esse valor se deve, sobretudo, à captura e à queima de 90% dos gases gerados no aterro sanitário. O cenário 3 apresenta redução de 69,2% do potencial de depleção da camada de ozônio em relação ao cenário atual (1). Isso mostra que a reciclagem de materiais contribui muito para a redução desse impacto. Entretanto, o cenário 4 revela que o tratamento da matéria orgânica na compostagem desviada do aterro diminui efetivamente o valor do sistema, com redução de 82,3% dessa categoria.

### 3.2.7 Potencial de toxicidade humana para o ar

O potencial de toxicidade humana refere-se principalmente a emissões de metais pesados para o ar, que possam vir a contaminar os seres humanos e o meio ambiente em que está inserido [22]. Esta categoria considera as emissões atmosféricas de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, Cd, Cr, Cu, Pb, Mg, Hg, Ni, Zn, hidrocarbonetos clorados e hidrocarbonetos totais. Na figura 10 são expostos os valores encontrados para o potencial de toxicidade humana relativo ao ar.

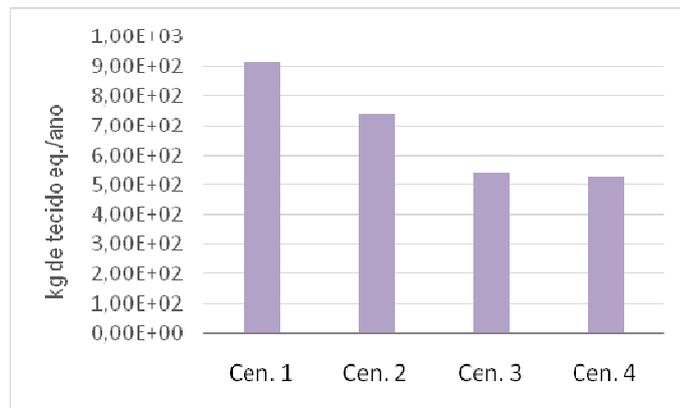


Figura 10: Contribuição de cada cenário para o potencial de toxicidade humana relativo ao ar.

A destinação dos resíduos sólidos urbanos diretamente para o aterro controlado, com consequente emissão de gases sem captura e tratamento, tornam o cenário atual (1) o mais impactante em relação à categoria de impacto relacionada ao potencial de toxicidade humana para a atmosfera.

A adição de um aterro sanitário diminui em 19% os valores de toxicidade humana no cenário 2. A causa principal da redução é a eficiência de captação de 90% dos gases produzidos

no aterro e a sua queima,, na qual há pequena difusão de gases pela cobertura dos aterros.

No cenário 3, o ganho ambiental é maior, se comparado ao cenário 2. A introdução da triagem e da reciclagem de materiais, no cenário 3, mostra uma redução desse impacto na taxa de 40,6% em relação ao cenário atual. O cenário 4 mostra um aumento na redução desse impacto, em torno de 42,7% em relação ao cenário atual (1). Isso se justifica pelo desvio do fluxo de 50% da matéria orgânica para a compostagem.

### 3.2.8 Potencial de toxicidade humana para a água

Os elementos considerados para a valoração dos impactos ambientais relacionados à toxicidade humana associada às emissões para a água são a As, Cd, Cr, Pb, Hg, Nitrato, Fosfato e Amônia. Na figura 11, é possível visualizar os valores para a toxicidade humana relativos à água.

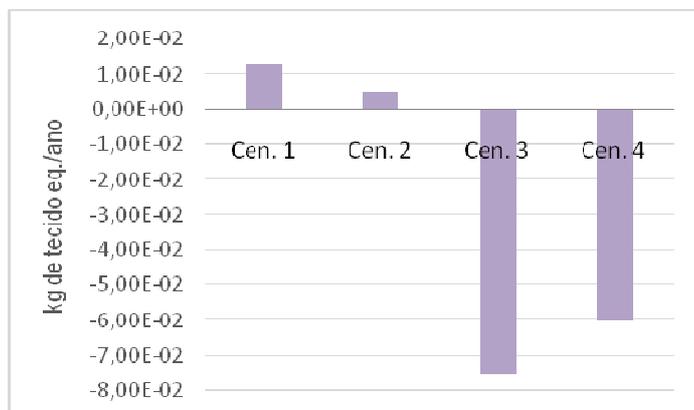


Figura 11: Contribuição de cada cenário para o potencial de toxicidade humana relativo à água.

O cenário atual (1) apresenta-se como o mais impactante em relação à toxicidade humana para as emissões aquosas. O cenário 2 revela uma redução de 62,3% em relação ao cenário atual (1). A redução se justifica pela substituição do aterro controlado por um aterro sanitário como forma de disposição final dos resíduos. Os valores de toxicidade humana para emissões aquosas apresentaram redução expressiva pelo fato de o aterro sanitário possuir uma camada protetora do solo que não permite que a amônia, principal elemento contribuinte para esse impacto, contamine o lençol freático. Contudo, a maior redução nos cenários simulados se apresenta no cenário 3, o qual prova a importância da triagem e da reciclagem no processo de tratamento do resíduo.

#### 4. Considerações Finais

A realização do diagnóstico do atual sistema de gerenciamento (cenário 1) de resíduos sólidos urbanos do município de Três Cachoeiras e mais a elaboração de três cenários permitiram identificar que a disposição final dos resíduos em um aterro controlado (cenário 1) é o maior causador de impactos ao meio ambiente. Esses impactos estão relacionados com os efluentes e as emissões gasosas gerados no aterro controlado, os quais não são coletados e/ou tratados. Além disso, o atual sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, em especial na etapa de destinação final dos resíduos sólidos urbanos (aterro controlado), apresenta altos índices de potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização e depleção da camada de ozônio quando comparado com os outros cenários simulados.

A introdução de triagem, reciclagem, compostagem e aterro sanitário apresentou os menores valores de impactos ambientais. O cenário 4 revelou uma redução de 89% no potencial de aquecimento global, 20,1% no potencial de acidificação, 39,4% no potencial de eutrofização, 82,3% no potencial de depleção da camada de ozônio, 42,7% no potencial

de toxicidade humana referente às emissões atmosféricas e 48,5% na redução do volume dos resíduos no aterro sanitário. O impacto de toxicidade humana referente às emissões aquosas além de reduzir em 100% o impacto, teve grande ganho ambiental, assim como no consumo de combustíveis fósseis.

Um fator importante a ser analisado é a característica do aterro sanitário. A simples queima dos gases gerados e a captação dos mesmos por diferença de pressão não diminuem os valores de potencial de acidificação e a baixa eficiência de tratamento do chorume produzido não reduzem os valores do potencial de eutrofização. Para se obter uma maior redução desses impactos, sugere-se a instalação de sistema a vácuo para a captura dos gases com posterior aproveitamento energético e maior eficiência no tratamento do lixiviado produzido pelos resíduos.

O desvio de materiais do aterro sanitário pelo processo de triagem dos recicláveis e a compostagem motivam a economia dos recursos naturais e de energia e diminui emissões atmosféricas de forma considerável, o que acarreta ganhos ao meio ambiente.

A compostagem da matéria orgânica contribui significativamente na redução das emissões atmosféricas, ocasionando uma redução desse impacto. Assim como na etapa de triagem dos recicláveis, o desvio da matéria orgânica aumenta a vida útil do aterro sanitário.

O município de Três Cachoeiras não possuía, até então, um estudo referente ao gerenciamento dos resíduos sólidos. Logo, este trabalho contribuiu de forma significativa para a obtenção de importantes informações referentes aos resíduos sólidos urbanos e seu gerenciamento no município, auxiliando, também, no processo de tomada de decisões para a implementação de projetos futuros.

---

### DIAGNOSIS AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM OF TRÊS CACHOEIRAS - RS.

**ABSTRACT:** Decision making has been the most challenging field for public administrators when dealing with solid waste management. Thus, using tools that help them making the best choices, save money and decrease environmental impacts becomes really important. This study presents an exploratory study on the integrated solid urban waste management process in Tres Cachoeiras/RS through a Life Cycle Assessment (LCA). For the development of the Life Cycle Assessment, this study used the *Integrated Waste Management (IWM) – 2* software (*version 2.5*). Moreover, simulations based on the characterization factors used by the computer software *SimaPro®* by *Pré Consultants* and published in the ReCiPe 2008 report were used to change values obtained in LCA and Life Cycle Assessments were performed evaluating the current waste management status, besides three other scenarios. The results show that the final waste disposal in controlled landfills is the

step that mostly contributes to environmental impacts. Scenario 4 is built by steps involving waste collection, transportation, sorting urban solid waste that can be recycled, sorting organic material and sanitary landfill and it presents the lower rates of contribution to environmental impacts. This showed a potential decrease of 89% in global warming, 20.1% in acidification, 39.4% in eutrophication, 82.3% in Ozone layer depletion, 42.7% in human toxicity coming from air emissions and 48.5% in reducing the amount of waste placed in landfills.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Environmental Impacts, Solid Urban Waste.

## Referências

- [1] CASTILHOS JUNIOR, Armando B. (Org.). Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 1-15.
- [2] MCDUGALL, M. R.; WHITE, P. R.; FRANKE, M.; HINDLE, P. Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory. 2<sup>nd</sup> Edition. Pub. Blacwell Science Ltd., Osney Mead, Oxford, England, 2001.
- [3] PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.
- [4] BRASIL, 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
- [5] KHOO, H. Life Cycle Impact Assessment of various waste conversion technologies. Waste Management 29 (1892 – 1900), 2009.
- [6] REICHERT, Geraldo Antônio. 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. 2013. 276 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, Brasil.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. Censo Demográfico. Rio de Janeiro, 2010.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Resíduos sólidos – Classificação: Norma NBR 10.004. São Paulo, 2004. 71 p.
- [9] MONTEIRO et al., José Henrique Penido. Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos; coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.
- [10] FERNÁNDEZ-NAVA, Y.; RÍO, Jd.; RODRÍGUEZ-IGLESIAS, J.; CASTRILLÓN, L.; MARAÑÓN, E. Life Cycle Assessment (LCA) of different municipal solid waste management options: A case study of Asturias (Spain), Journal of Cleaner Production (2014), doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.008.
- [11] SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau. Journal of Cleaner Production 57, 92-100, 2013.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. NBR ISO 14.040. ABNT: Rio de Janeiro, 2001, 9p.
- [13] RODRÍGUEZ-IGLESIAS, J.; MARAÑÓN, E.; CASTRILLÓN, L.; RIESTRA, P.; SASTRE, H. Life cycle analysis of municipal solid waste management possibilities in Asturias, Spain. Waste Management & Research. 21, 535–548. 2003.
- [14] BANAR, M.; COKAYGIL, Z.; OZKAN, A. Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. Waste Management 29, 54-62, 2009.
- [15] RIGAMONTI, L.; GROSSO, M.; GIULIANO, M. Life cycle assessment for optimizing the level of separated collection in integrated MSW management systems. Waste Management 29,934–944, 2009.
- [16] ÖZELER, D.; YETIS, Ü.; DEMIRER, G.N. Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. Environment International, 32, 405 – 411, 2006.
- [17] HONG, J.; Li, X.; ZHAOJIE, C. Life Cycle Assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. Waste management (New York, N.Y.), 30, 2362-2369. Elsevier, 2010.
- [18] TARANTINI, M. et al. Life Cycle Assessment of waste management systems in Italian industrial areas: Case study of 1st Macrolotto of Prato. Energy 34 (613-622), 2009.
- [19] BOVEA, M. D.; POWELL, J. C. Alternative scenarios to meet the demands of sustainable waste management. Journal of environmental management. 79, 115-132, 2006.
- [20] MONTEIRO, M. F. Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- [21] KULAY, L. A. Desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida adequado às condições brasileiras: Aplicação ao caso do superfosfato simples. 2000. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [22] LEME, et al. Avaliação Ambiental das opções tecnológicas para geração de energia através dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso. In: Anais do 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em Produtos e Serviços. Florianópolis, Novembro de 2010.