

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## ANÁLISE SOBRE OS IMPACTOS AMBIENTAIS DO PROGRAMA DE COLETA SELETIVA DO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA - PB/BRASIL

\* Wanessa Alves Martins<sup>1</sup>  
Claudia Coutinho Nóbrega<sup>1</sup>  
Valeria Ibáñez-Forés<sup>2</sup>  
María Dolores Bovea<sup>2</sup>  
Cristine Helena Limeira Pimentel<sup>3</sup>  
Viviane Farias Silva<sup>4</sup>

## ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE SELECTIVE COLLECTION PROGRAM IN THE MUNICIPALITY OF JOÃO PESSOA - PB/BRAZIL

Recibido el 20 de julio de 2020. Aceptado el 12 de abril de 2021

### Abstract

*Municipal solid waste (MSW) has a significant potential to generate environmental impacts. Depending on how the management steps are performed, waste can cause impacts through gaseous, liquid and solid emissions in the various stages of the process. This study aims to evaluate the life cycle of the selective collection program of the MSW to identify possible environmental impacts resulting from the implementation of this system in the municipality of João Pessoa - PB. Primary and secondary data were collected from a ten-year period and the Life Cycle Assessment (LCA) was used. The software used was SimaPro 8.0.1 and the methodology developed was CML-IA baseline version 3.00/World 2000. The categories evaluated were: eutrophication; acidification; photochemical oxidation; global warming; ozone layer depletion and human toxicity. During this period, it was observed that the selective collection program contributed to the reduction of several emissions of pollutants into the atmosphere. The acidification category had negative emission in all years evaluated. Eutrophication only showed negative emission in 2015, considering that this year the quantitative collected by recycling were higher than the other years. However, for the categories photochemical oxidation, global warming, ozone layer depletion and human toxicity, the reductions in pollutant emissions at the recycling stage were not sufficient so that these categories did not generate impacts. Thus, for greater reductions in emissions, mechanisms should be sought to optimize the selective collection program of the municipality, increasing recycling, in addition to implementing the reuse of gases produced in the landfill.*

**Keywords:** *life cycle assessment, environmental pollution, solid waste, recycling.*

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción Universitat Jaume I, España.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Cabedelo, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

\* *Autor Correspondente:* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, s/n, João Pessoa, Paraíba. CEP: 58051-900, Brasil. Email: [wanessamartins.eng@gmail.com](mailto:wanessamartins.eng@gmail.com)

## Resumo

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) possuem um potencial significativo de gerar impactos ambientais. Dependendo de como são executadas as etapas do gerenciamento, os resíduos podem provocar impactos através das emissões gasosas, líquidas e sólidas nas diversas etapas do processo. O presente estudo tem como objetivo avaliar o ciclo de vida do programa de coleta seletiva dos RSU para identificar possíveis impactos ambientais decorrentes da implantação deste sistema no município de João Pessoa – PB. Foram coletados dados primários e secundários de um período de dez anos e utilizado a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O software utilizado foi o SimaPro 8.0.1 e a metodologia desenvolvida foi CML-IA baseline versão 3.00/World 2000. As categorias avaliadas foram: eutrofização; acidificação; oxidação fotoquímica; aquecimento global; depleção da camada de ozônio e toxicidade humana. Neste período, foi observado que o programa de coleta seletiva contribuiu para a redução de diversas emissões de poluentes para a atmosfera. A categoria acidificação teve emissão negativa em todos os anos avaliados. A eutrofização só apresentou emissão negativa em 2015, tendo em vista que neste ano os quantitativos recolhidos pela reciclagem foram superiores aos demais anos. Entretanto, para as categorias oxidação fotoquímica, aquecimento global, depleção da camada de ozônio e toxicidade humana as reduções na emissão de poluentes na etapa da reciclagem não foram suficientes para que estas categorias não gerassem impactos. Assim, para maiores reduções das emissões, deve-se buscar mecanismos que visem otimizar o programa de coleta seletiva do município, aumentando a reciclagem, além de implantar o reaproveitamento dos gases produzidos no aterro.

**Palavras chave:** avaliação do ciclo de vida, poluição ambiental, resíduos sólidos, reciclagem.

---

## Introdução

O aumento populacional e o elevado consumo de bens e serviços têm gerado inúmeros desafios ambientais e de saúde pública, principalmente, no que diz respeito à gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. A gestão dos RSU está relacionada ao controle da geração de resíduos, armazenamento, coleta, transferência e transporte, processamento e disposição, levando em consideração os melhores princípios de saúde pública, economia, engenharia e outras considerações ambientais (Khandelwal *et al.*, 2019; Ramachandra *et al.*, 2018).

De acordo com o Relatório do Banco Mundial, no ano de 2016, foram gerados 2.01 bilhões de toneladas de RSU na Terra (Kasa *et al.*, 2018). A previsão é de que até 2050 a geração de resíduos cresça para 3.04 bilhões de toneladas/ano, caso não ocorram mudanças no padrão de consumo. No Brasil, a geração de resíduos urbanos no ano de 2018, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2020), foi de 79 milhões de toneladas, representando um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano de 2017. Em valores per capita, a geração foi 1.039 kg/hab/dia. Já na região Nordeste, a geração de RSU foi de 53 975 toneladas por dia, representando uma geração per capita de 0.951 kg/hab/dia.

Nesta perspectiva, com o aumento da taxa de geração de RSU, a eficiência de coleta e descarte de resíduos também deve aumentar proporcionalmente (Yadav e Samadder, 2018). Assim, a

gestão sustentável dos RSU requer uma abordagem holística que considere as partes envolvidas, seus relacionamentos e diferentes fatores de tomada de decisão (Durán e Messina, 2019). Costa e Dias (2020) afirmam que melhorias na gestão de resíduos podem ser alcançadas através da aprovação e implementação eficaz de políticas de gestão de resíduos. No Brasil, pode-se verificar algumas mudanças no gerenciamento dos RSU, a partir da aprovação da Lei nº. 12 305/2010, que trouxe princípios, objetivos e as principais diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que são fundamentais para uma gestão adequada (Brasil, 2010).

Desta forma, antes de serem encaminhados para os aterros sanitários, deve-se verificar o potencial de reaproveitamento e reciclagem. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2012), a disposição final adequada dos resíduos sólidos deveria passar por uma triagem, na qual 85% de todo resíduo seria reciclado e somente 15% do total, denominado rejeito, seria encaminhado ao aterro sanitário. De acordo com a PNRS os RSU são os mais diversos tipos de resíduos gerados no meio urbano (Brasil, 2010). Entretanto, nesta pesquisa os RSU se referem aos resíduos de origem domiciliar, comercial (até 200L) e oriundos de varrição.

A reciclagem pode ser entendida como um conjunto de técnicas destinadas a remover os resíduos mais valiosos e reutilizá-los no ciclo de produção, seja no ciclo de produção original ou em paralelo (Oliveira Neto *et al.*, 2017). A coleta seletiva é uma etapa primordial para a reciclagem, sendo realizada quase inteiramente por catadores informais que selecionam os resíduos para garantir seus meios de subsistência (Coelho *et al.*, 2019). No município de João Pessoa, a coleta seletiva dos RSU teve início no ano de 1997, no qual foram colocados alguns Pontos de Entrega Voluntária (PEVs). Porém o programa não obteve sucesso, principalmente pela falta de participação da população. No ano 2000, foi reiniciado o programa de coleta seletiva, dessa vez porta a porta e, em 2005, o programa supracitado passou a ter uma maior abrangência (Município de João Pessoa, 2014).

Com a implantação da coleta seletiva, a capital paraibana tem evoluído em relação ao gerenciamento dos RSU. Para avaliar essa evolução, buscar aperfeiçoar e propor novas alternativas para o gerenciamento é primordial que seja realizada uma análise dos impactos relacionados. Com a finalidade de adquirir esse conhecimento, a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) deve ser utilizada. A ACV é uma ferramenta que avalia os impactos ambientais relacionados a um produto e/ou serviço cuja abrangência compreende desde a extração da matéria-prima até a disposição final (Chehebe, 1997). Desta forma, ao aplicar a ACV na análise de RSU, é possível diagnosticar os impactos ambientais referentes à sua gestão, como pode ser utilizada para identificar modelos que melhor respondam as expectativas locais, de maneira que se obtenha um resultado que otimize a geração de energia, minimize os impactos ambientais, entre outras vantagens (Araújo, 2013; Bovea *et al.*, 2010).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo, avaliar o ciclo de vida do programa de coleta seletiva dos RSU para identificar possíveis impactos ambientais decorrentes da implantação deste sistema no município João Pessoa – PB. Este artigo abrange principais pontos abordados no trabalho de dissertação “Avaliação do ciclo de vida do programa de coleta seletiva do município de João Pessoa-PB, Brasil”, apresentado ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM, da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

## Metodologia

### Caracterização da área estudada

O município de João Pessoa (Figura 1), capital do estado da Paraíba, limita-se com os municípios de Cabedelo (norte), Conde (sul), Bayeux (oeste), Santa Rita (sudoeste e nordeste) e pelo Oceano Atlântico (leste). De acordo com o último censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o referido município possuía 723 515 habitantes, com população estimada para o ano de 2019 em 809 015 habitantes ocupando uma área de 211 475 Km<sup>2</sup> (IBGE, 2020).

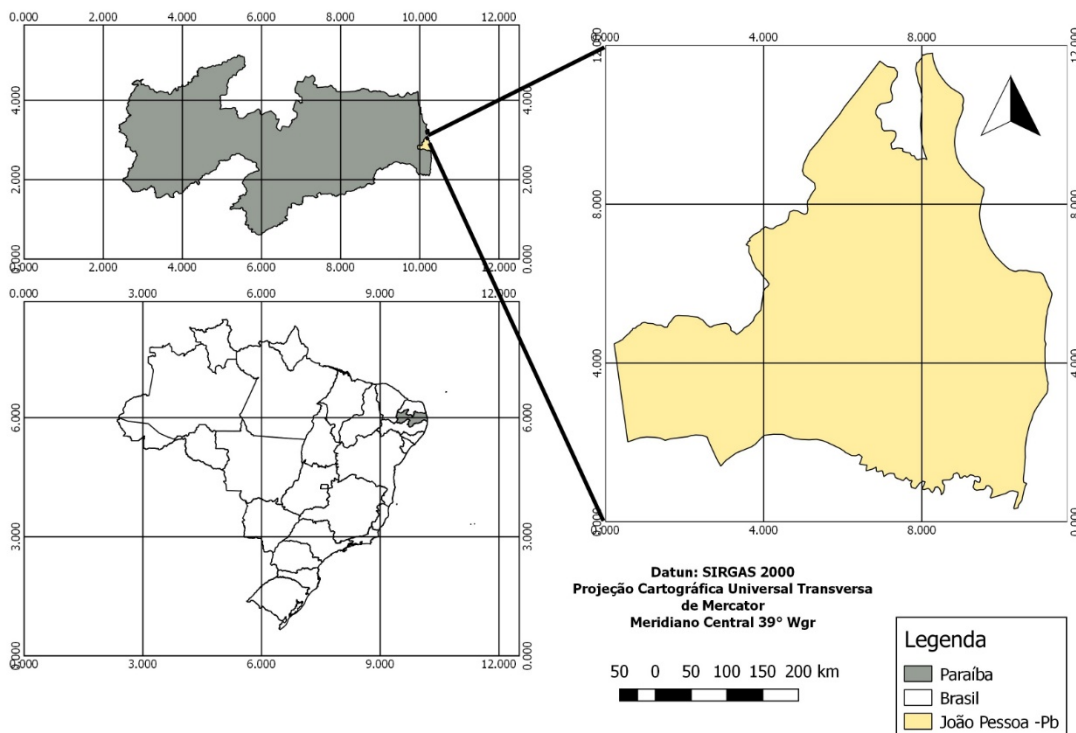
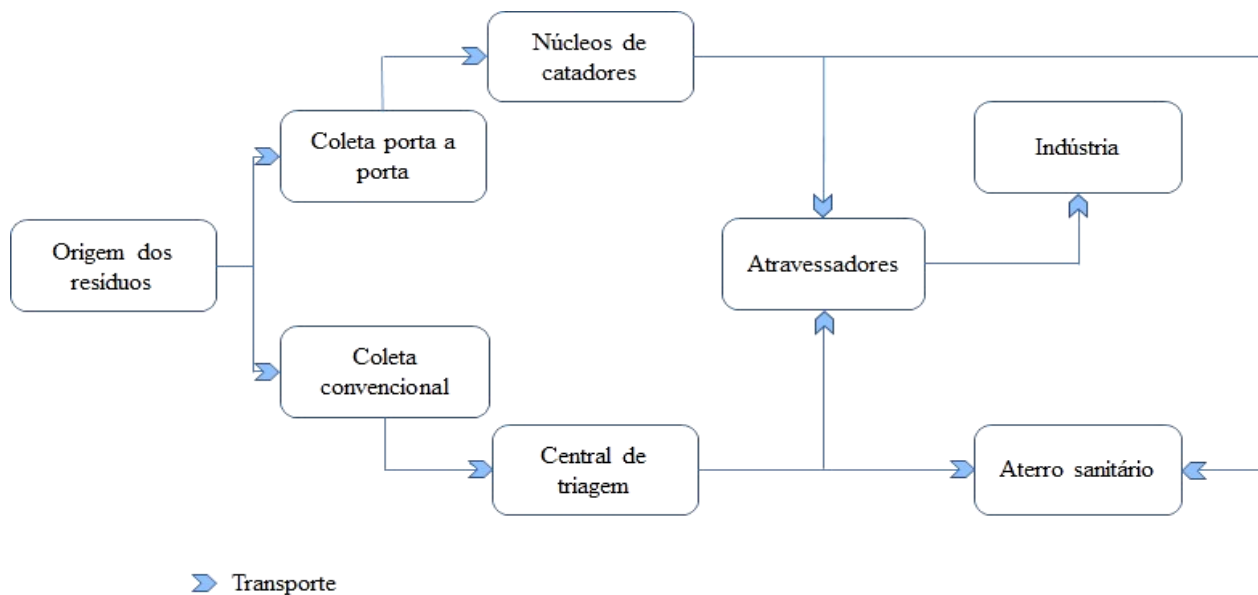


Figura 1. Localização do município de João Pessoa/PB. Fonte: QGIS, 2020.

No município, a coleta seletiva teve início antes da aprovação da Lei nº 12 305/2010, tendo em vista que em 1997 foram colocados alguns PEVs. Porém, devido à falta de participação da população, o programa não teve sucesso. No ano 2000, foi iniciado o programa de coleta seletiva porta a porta e, em 2005, o programa supracitado passou a ter maior abrangência (MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA, 2014). Sabe-se que no Brasil segundo a Abrelpe, 2018 a taxa de resíduos sólidos urbanos coletados é menor que 2%, assim torna-se necessário pesquisas que avaliem os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo do programa de coleta seletiva.

No que se refere a gestão dos resíduos sólidos, o município conta com quatro associações de catadores de materiais recicláveis e sete núcleos de coleta seletiva (Cabo Branco, Bessa, Mangabeira, Jardim Cidade Universitária, Estados, Roger e Catajampa) e uma Central de Triagem, localizada próximo ao Aterro Metropolitano de João Pessoa - ASMJP.

Rotas dos Resíduos Sólidos Urbanos no município de João Pessoa – PB



**Figura 2.** Fluxograma do Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos de João Pessoa - PB.

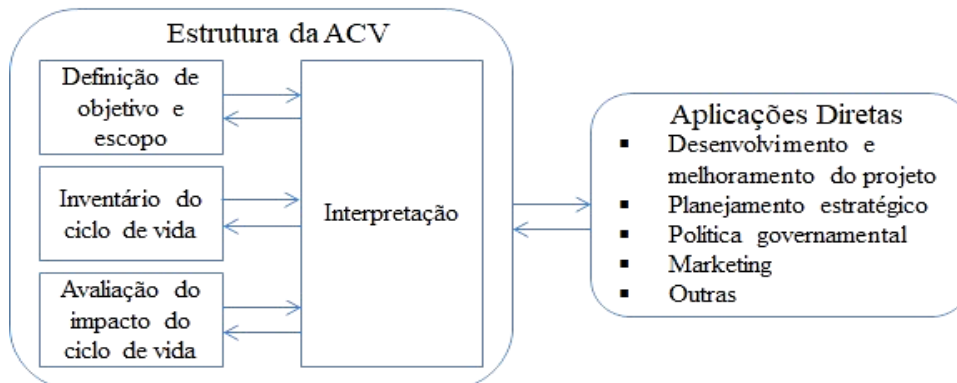
A coleta dos resíduos sólidos tem início com o descarte pelos moradores, após este processo os resíduos podem ter duas rotas diferentes, a primeira delas é serem recolhidos pela coleta convencional ou indiferenciada e serem encaminhados para Central de Triagem, na qual certa porcentagem desse resíduo é aproveitável para a comercialização e o rejeito segue para o aterro sanitário.

A segunda rota é serem coletados por catadores porta a porta, que recolhem os resíduos, previamente separados pelos moradores e levam a um galpão dos respectivos núcleos de coleta, mantido pela EMLUR, onde esses materiais são separados de acordo com a sua tipologia para a comercialização.

O mecanismo de venda funciona através dos agentes intermediários (atravessadores) que por sua vez, revendem o material coletado para as indústrias recicladoras. Estes atravessadores participam do processo de reciclagem, tendo em vista que os catadores não conseguem comercializar a quantidade mínima de materiais solicitada pela indústria. Na Figura 2 observa-se o fluxograma do sistema de gestão de resíduos sólidos do município de João Pessoa/PB.

### Avaliação do Ciclo de Vida

Esta etapa metodológica foi realizada seguindo as recomendações da norma ABNT ISO 14 040 (2014) e ISO 14 044 (2014) (Figura 3).



**Figura 3.** Estrutura metodológica da Avaliação do Ciclo de Vida. Fonte: ABNT, 2014.

### Definição do Objetivo e Escopo

O objetivo deste estudo é avaliar possíveis impactos ambientais oriundos do programa de coleta seletiva do município de João Pessoa – PB. Para a realização deste estudo foram delimitadas as seguintes etapas: coleta e transporte do material, das residências até os núcleos de coleta seletiva e a Central de Triagem (CT); separação dos resíduos nos galpões dos núcleos pelos catadores e na CT, bem como, sua preparação para comercialização (vidro, papel/papelão, metal, plástico e borracha); venda dos materiais aos agentes intermediários e, sua revenda as indústrias de reciclagem da região, levando em consideração o quantitativo de resíduos aterrado. A unidade funcional (UF) deste estudo foi de uma tonelada de resíduo por habitante-ano na unidade de triagem, conforme sugerido por Ibáñez-Forés (2009).



### Inventário do Ciclo de Vida- ICV

Para a elaboração da análise do inventário foi necessário:

- A quantificação dos resíduos coletados no município (2005 a 2015) e a sua distribuição considerando duas rotas (coleta seletiva e coleta convencional).
- Fixação de um percentual de eficiência para os materiais coletados, ou seja, para o papel/papelão (97.50%), plástico (80%), metal e vidro (90%) e 100% para a borracha, esses percentuais foram obtidos na literatura de Rigamontti, *et al.*, (2009) e quantificar os material vendido para os intermediários (atravessadores), levando em consideração tais percentuais.
- Quantificação do consumo de diesel utilizado no transporte da coleta seletiva para os núcleos e da coleta convencional. Esses dados foram disponibilizados pela EMLUR (2017), e pelos catadores através de estimativa. Essas estimativas foram calculadas através do conhecimento do tipo de veículo.
- Quantificação do consumo de água, eletricidade e diesel, correspondente aos núcleos, central de triagem, aterro sanitário, galpões dos atravessadores e das indústrias recicladoras foram retirados a partir dos dados disponíveis pela EMLUR (2017).

O software utilizado foi o SimaPro 8.0.1, o banco de dados Ecoinvent, ambos foram escolhidos por serem os mais utilizados em pesquisas que envolvam a gestão dos resíduos sólidos (Laurent *et al.*, 2014).

### Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

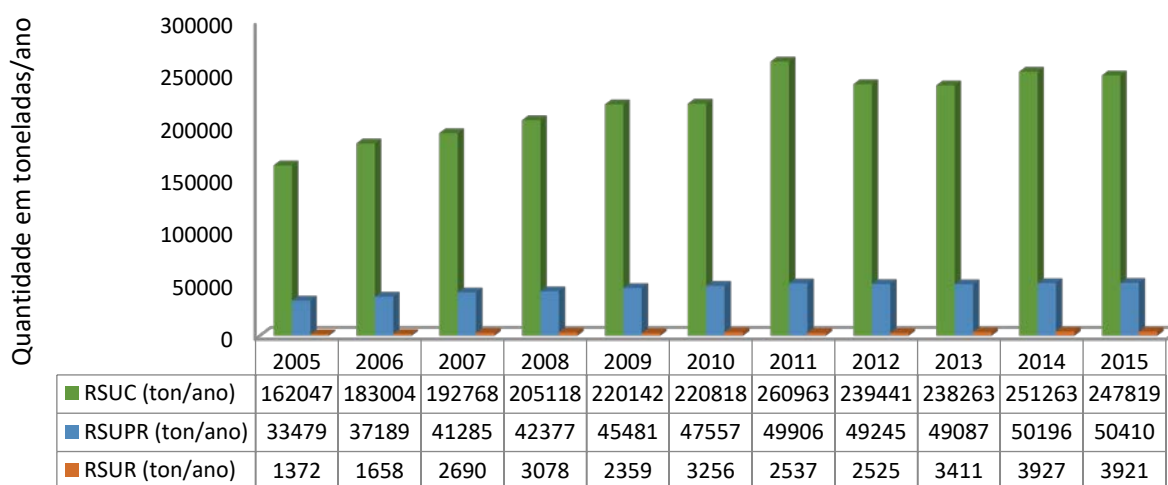
O método de análise do inventário foi o CML - IA (2001) baseline versão 3.00/World 2000, que segundo Laurent *et al.*, (2014), corresponde a metodologia mais utilizada para avaliar impactos ambientais do ciclo de vida de sistemas de gestão de resíduos sólidos. Entre as categorias disponibilizadas pelo método, foram selecionadas seis categorias: Eutrofização, Acidificação, Oxidação fotoquímica, Aquecimento global, Depleção da Camada de Ozônio e Toxicidade humana.

## **Resultados**

### Quantitativos dos Resíduos Sólidos Urbanos

No ICV, foram quantificados os RSU coletados no município (período de 2005 a 2015), considerando o destino (coleta seletiva, central de triagem e aterro sanitário). Na Figura 4, podem-se observar os quantitativos dos Resíduos Sólidos Urbanos Coletados (RSUC), os Resíduos Sólidos Urbanos Potencialmente Recicláveis (RSUPR) e os Resíduos Sólidos Urbanos Reciclados (RSUR) (coleta seletiva e central de triagem).

Os quantitativos coletados foram aumentando no decorrer dos anos, com destaque para o ano de 2011, 2014 e 2015 que obtiveram o maior volume entre os anos de estudo. Para o município, Pimentel *et al.*, (2020) citam 20.60% como percentual de resíduos passível de reciclagem. Considerando esse percentual os resíduos reciclados no município apresentaram um percentual de 4.1% em 2005 e de 7.8% em 2015.

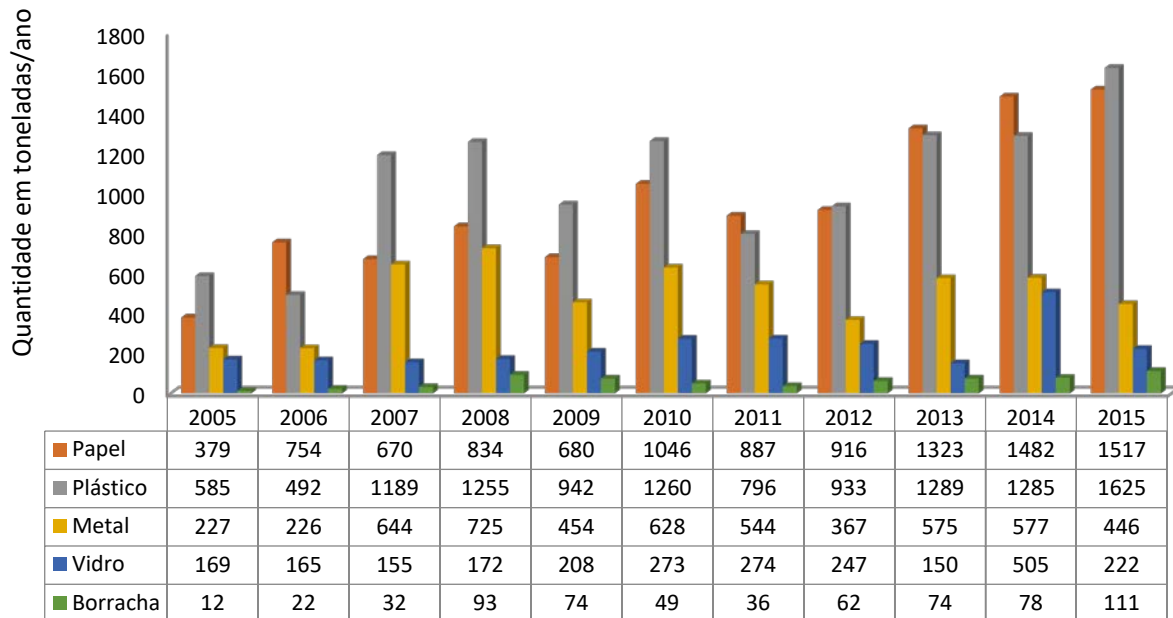


**Figura 4.** Quantitativo de resíduos coletados, potencialmente recicláveis e recuperados no município de João Pessoa - PB. Fonte: EMLUR (2017).

O volume dos materiais recicláveis por tipologia (papel/papelão, plástico, metal, vidro e borracha) correspondente a coleta seletiva e a central de triagem no período de 2005 a 2015 pode-se visualizar na Figura 5.

Entre os materiais coletados o papel/papelão e o plástico apresentaram os maiores quantitativos. Além dos quantitativos de resíduos, outras informações também foram consideradas para o Inventário do Ciclo de Vida: consumo de diesel (L/t), energia (KWh/t) e água (Kg/t). No que se refere coleta seletiva das residências até os núcleos de coleta foram considerados o consumo total de 188.28 litros de diesel por cada tonelada de resíduo coletado. Já na coleta indiferenciada foi considerado um total de 14.25 litros de diesel por cada tonelada coletada. O consumo de energia da usina de triagem foi 45.878 kWh por tonelada, o consumo dos galpões de reciclagem foi de 50.116 kWh por tonelada e o consumo no aterro sanitário foi de 0.041 kWh por tonelada.





**Figura 5.** Quantitativos dos materiais recicláveis por tipologia produzidos no município de João Pessoa - PB.  
Fonte: EMLUR (2017).

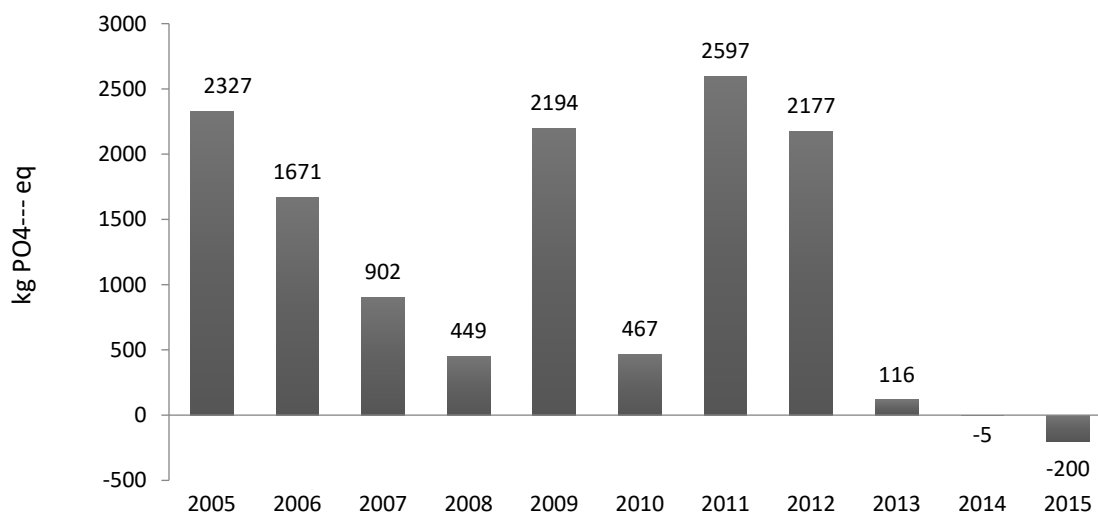
### Avaliação do Ciclo de Vida

Foram geradas contribuições líquidas para cada categoria de impacto em cada ano estudado. Desta forma, valores negativos representam benefícios ambientais e são atribuídos a não ocorrência de emissões. Já os valores positivos, indicam prejuízos ao meio ambiente, proporcionando emissões de poluentes (Foolmaun e Ramjeeawon, 2013; Garret e Collins, 2009; Popita *et al.*, 2017).

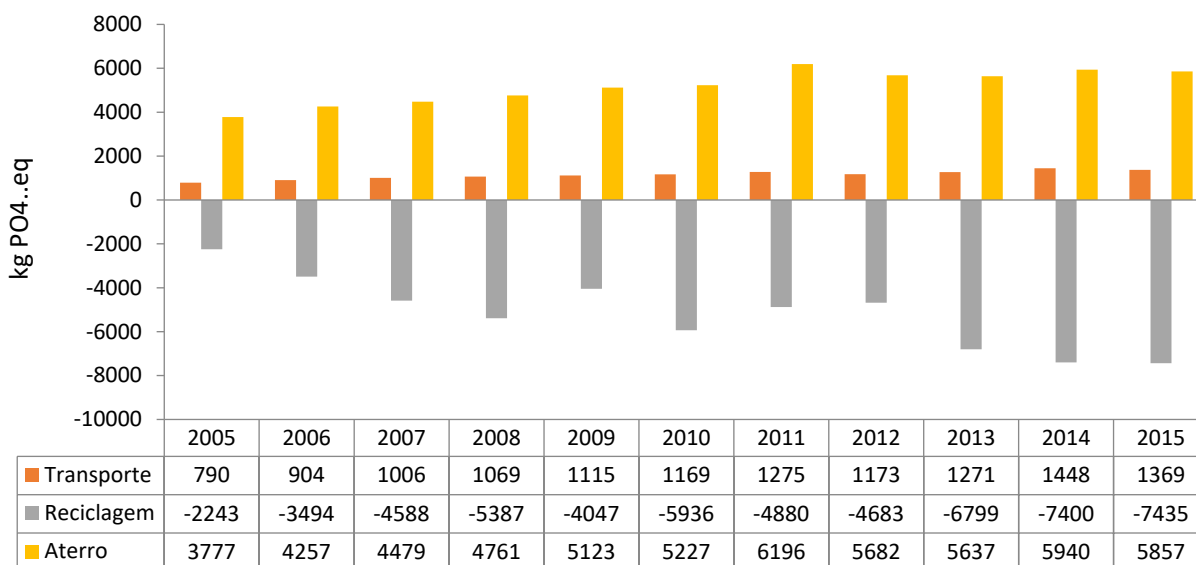
### **Categoria de Eutrofização**

A eutrofização é um fenômeno que influencia tanto os ecossistemas terrestres, como os aquáticos. O processo de eutrofização ocorre na gestão dos resíduos sólidos a partir da contaminação dos corpos hídricos pelos nutrientes oriundos da decomposição dos resíduos sólidos (Martins, 2017). É possível observar-se na Figura 6 a contribuição geral do programa de coleta seletiva para a categoria eutrofização na série histórica de 2005 a 2015.

A partir da Figura 6, verifica-se que a emissão de gases contribuíram para a eutrofização na maioria dos anos, com exceção para 2015 que gerou uma contribuição negativa. Analisando as etapas aterro sanitário, transporte e reciclagem (Figura 7) verifica-se que o aterro sanitário foi a etapa que mais contribuiu para essa categoria, seguindo pela etapa do transporte (Martins, 2017).



**Figura 6.** Contribuição do programa coleta seletiva para a categoria eutrofização, período de 2005 a 2015.  
*Fonte: Autores, 2017.*



**Figura 7.** Contribuição das etapas transporte, reciclagem e aterro sanitário para a categoria eutrofização, período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

Este fato pode ser entendido devido ao aterro sanitário não possuir o aproveitamento energético dos gases produzidos nesta etapa, como também pela queima de combustíveis fósseis na etapa de transporte, emitindo poluentes para a atmosfera. A reciclagem apresentou um desempenho significativo para a redução desses gases, mas em proporções menores que nas etapas anteriores para a maioria dos anos. No entanto, em 2014 e 2015, a etapa da reciclagem compensou as emissões provenientes das etapas do aterro e do transporte (Martins, 2017).

Em trabalho desenvolvido por Trentin (2015) a coleta e a disposição final em aterro sanitário foram de forma análoga, as principais causadoras de impacto na categoria eutrofização. Tarantini *et al.*, (2009), afirma que a liberação de gases presentes nos lixiviados dos aterros representa uma contribuição significativa para esta categoria de impacto. Em estudo com diferentes cenários Alencar (2013) constatou que o aterro sanitário apresenta-se como um grande contribuinte de  $PO_4$  no meio ambiente. Segundo Guereca *et al.*, (2006), o aterro sanitário também representa o principal responsável pelo impacto da eutrofização em decorrência do lixiviado produzido emitir gases.

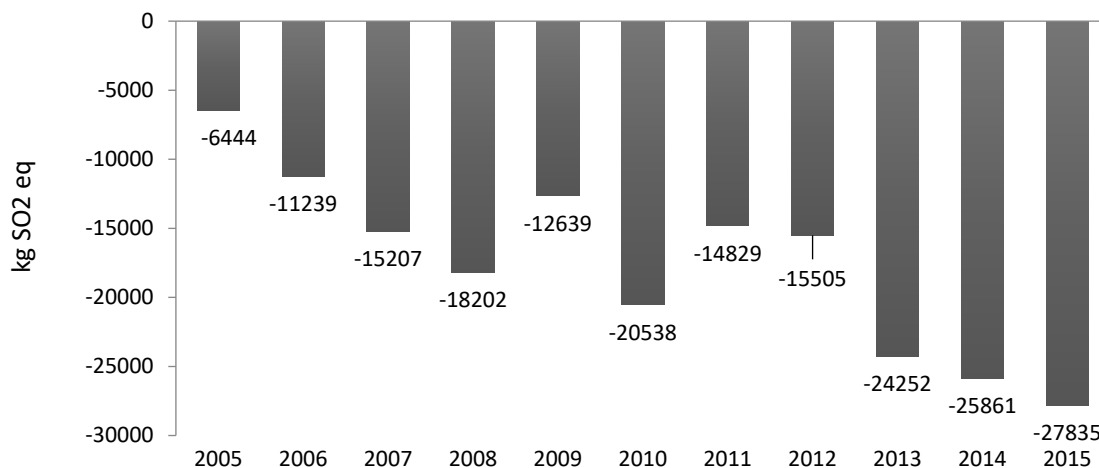
No estudo desenvolvido por Garcia (2016), o aterro sanitário também apresentou uma maior contribuição para a categoria eutrofização. Bovea e Powell (2006) afirmam que a introdução das etapas de triagem, compostagem e recuperação energética, evitam o impacto por eutrofização. Sabe-se que mesmo o ASMJP possuindo a etapa da triagem, a não aproveitamento energético dos gases neste período, provavelmente, foi o fator que mais contribuiu para a os impactos da categoria eutrofização.

### **Categoria Acidificação**

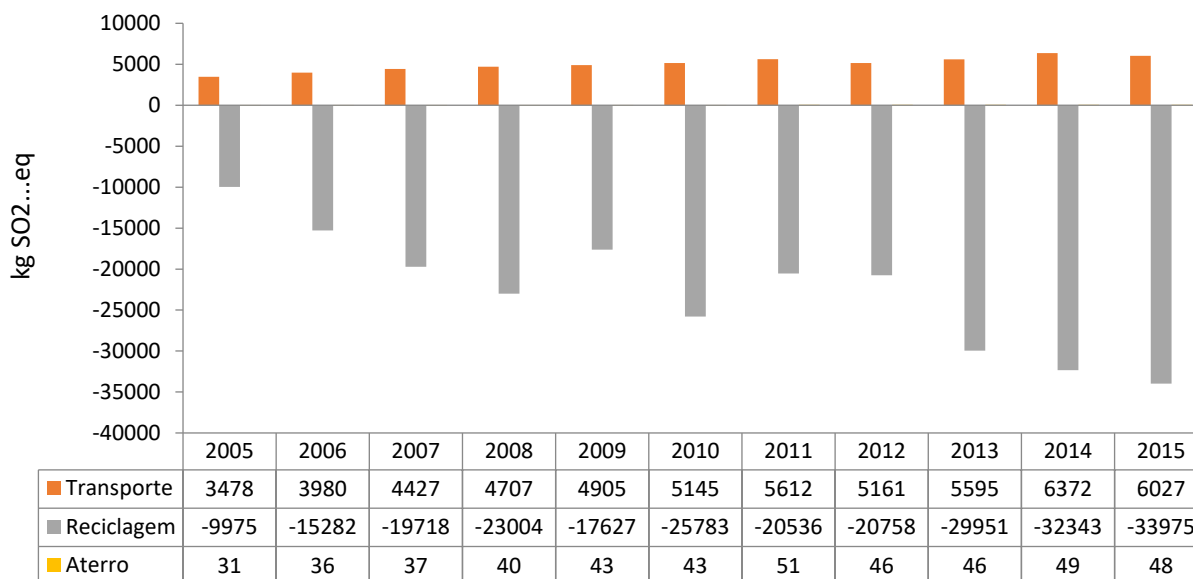
A categoria acidificação está relacionada aos impactos derivados dos processos que aumentam a acidez nos corpos hídricos e nos solos pela concentração de íons de hidrogênio (Martins, 2017). A acidificação é causada pela emissão atmosférica e deposição de substâncias químicas acidificantes (Mendes, 2013). Na Figura 8, estão dispostas as contribuições geradas pelas etapas do programa de coleta seletiva para a categoria de acidificação.

Constata-se na Figura 8, que na série histórica estudada, o impacto da categoria de acidificação foi negativo em todos os anos, com destaque para 2015 que atingiu a maior contribuição negativa. Esse fato pode ser compreendido pelo quantitativo de resíduos sólidos encaminhados para a reciclagem nesse ano (Figura 5).

Na Figura 9, observa-se que em todos os anos a etapa da reciclagem compensou as contribuições positivas geradas na etapa do transporte para a categoria acidificação, tendo o ano de 2015 atingido o maior índice de reciclagem. Desta maneira, o quantitativo de material reciclável coletado no ano 2015, contribuiu significativamente para a redução da necessidade de novos materiais que seriam responsáveis pela emissão de mais poluentes.



**Figura 8.** Contribuição do programa coleta seletiva para a categoria de acidificação, período de 2005 a 2015.  
*Fonte: Autores, 2017.*



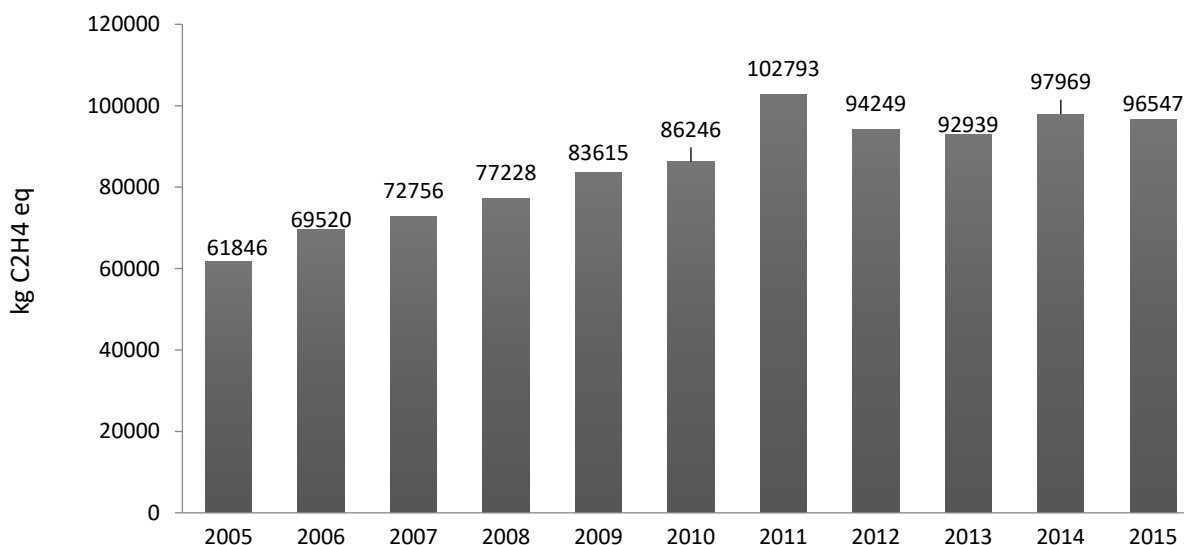
**Figura 9.** Contribuição das etapas transporte, reciclagem e aterro sanitário para a categoria acidificação, período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

De acordo com Ibáñez-Fóres (2009), a reciclagem representa um impacto positivo na categoria de acidificação, onde diversas substâncias, como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> entre outras, deixam de serem emitidas para a atmosfera, através do uso de materiais reciclados. Ainda segundo a autora, para cada tonelada de papel reciclado é evita-se a emissão de 2 320g de SO<sub>x</sub>. Em estudo desenvolvido por Alencar (2013), foi obtido uma redução de 59.8% do potencial de acidificação nas etapas de triagem e reciclagem dos materiais recicláveis, quando comparado com a coleta e disposição dos resíduos no lixão.

Para os autores Özeler *et al.*, (2006), em estudo realizado na cidade de Ankara (Turquia), constataram que os impactos ambientais relacionados a acidificação foram reduzidos com o acréscimo dos quantitativos de materiais reciclados. Nessa mesma linha, Chi *et al.*, (2014) também afirmam que a reciclagem fornece a produção de novos materiais, substituindo os que são fabricados a partir de materiais virgens, assim, evita-se novas emissões.

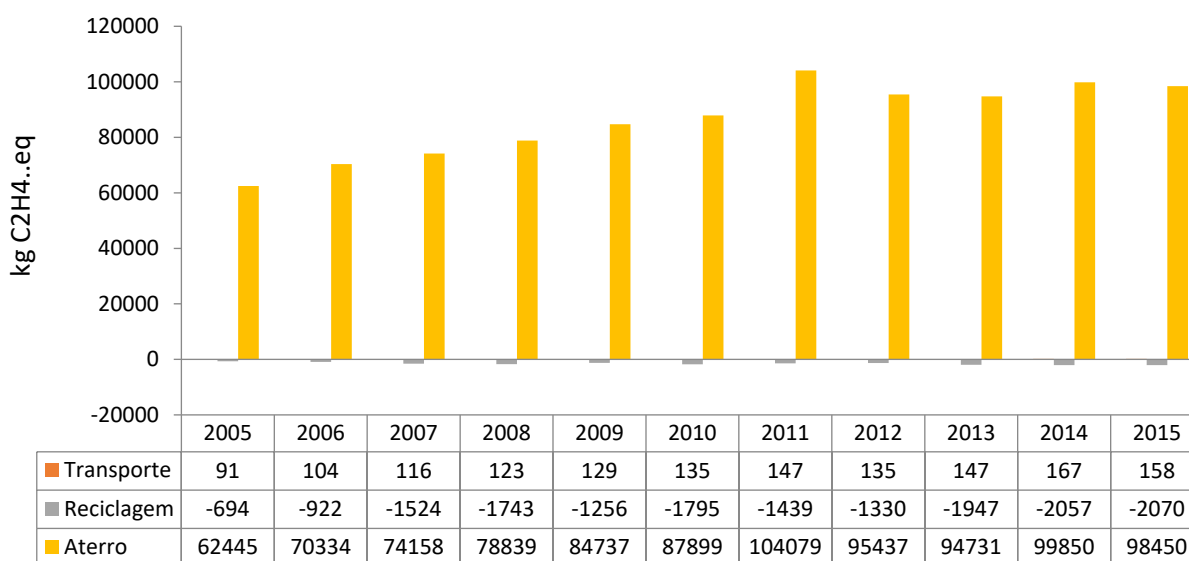
### Categoria Oxidação Fotoquímica

As substâncias que possuem um potencial para a formação de ozônio fotoquímico são os compostos orgânicos voláteis (COV), que contêm hidrogênio e/ou dupla ligação. Os impactos potenciais são expressos a partir da emissão da substância de referência etileno C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (Hauschild e Wenzel, 1998). Na Figura 10, estão apresentadas as contribuições geradas pelas etapas do programa de coleta seletiva para a categoria de impacto oxidação fotoquímica durante a série histórica em estudo.



**Figura 10.** Contribuição do programa de coleta seletiva para a categoria oxidação fotoquímica, período de 2005 a 2015. Fonte: Autores, 2017.

Através da Figura 10, observa-se que o programa de coleta seletiva gerou contribuições positivas, para a categoria oxidação fotoquímica, durante todos os anos analisados. Por meio da Figura 11, observa-se que etapa do aterro sanitário foi a que mais contribuiu na emissão de gases  $C_2H_4$  para a atmosfera. Assim, pode-se constatar que a reciclagem ainda se apresenta insuficiente para compensar os COV emitidos na etapa do aterro sanitário.



**Figura 11.** Contribuição das etapas transporte, reciclagem e aterro sanitário para a categoria oxidação fotoquímica no período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

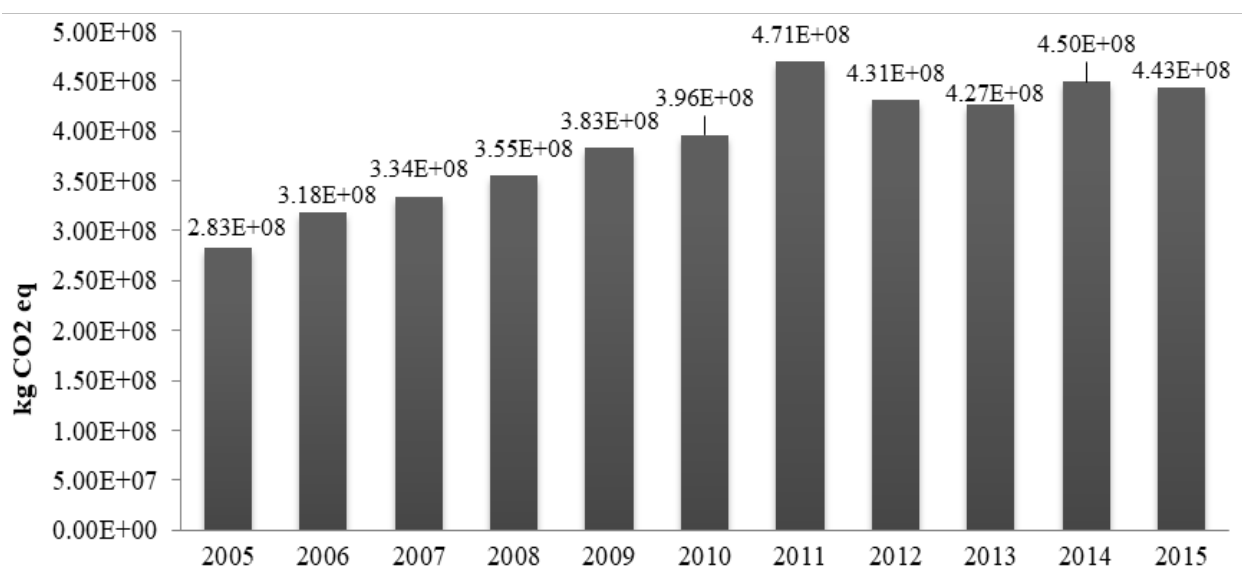
No estudo de Garcia (2016) foi obtido um resultado semelhante, no qual o aterro sanitário era a etapa que mais contribuía com a oxidação fotoquímica. Nesse mesmo estudo, também identificou-se que a quantidade de emissões evitadas pela reciclagem, ainda é insuficiente em relação às emissões geradas pela etapa do aterro sanitário.

De acordo com Tarantini *et al.*, (2016), cerca de 9% dos COV que contribuem para a oxidação fotoquímica advém da etapa do transporte. Já Trentin (2015) e Mersoni (2015) analisaram diversos cenários em seus estudos, e constataram que a coleta e o aterro sanitário foram as etapas que mais contribuíram com a emissão para esta categoria. Na coleta, a emissão dos COV decorre da queima dos combustíveis fósseis, enquanto que no aterro sanitário, essa emissão ocorre através da decomposição dos lixiviados. Para Ibáñez-Fóres (2009), a recuperação energética do aterro sanitário é um fator essencial para a redução do impacto ambiental desta categoria, reduzindo emissões superiores a 50%, pois, evitaria que  $C_2H_4$  fossem emitidos para a atmosfera.



### Categoria Aquecimento Global

A emissão dos gases de efeito estufa são os principais responsáveis pelo aquecimento global. (Tarantini *et al.*, 2009). De acordo com Zaman (2013), os resíduos pode contribuir com o aquecimento global, pois possuem subprodutos gasosos nocivos e partículas que podem aumentar os gases de efeito estufa. Na Figura 12, observa-se as contribuições geradas pelo programa de coleta seletiva para a categoria de impacto aquecimento global nos anos analisados.

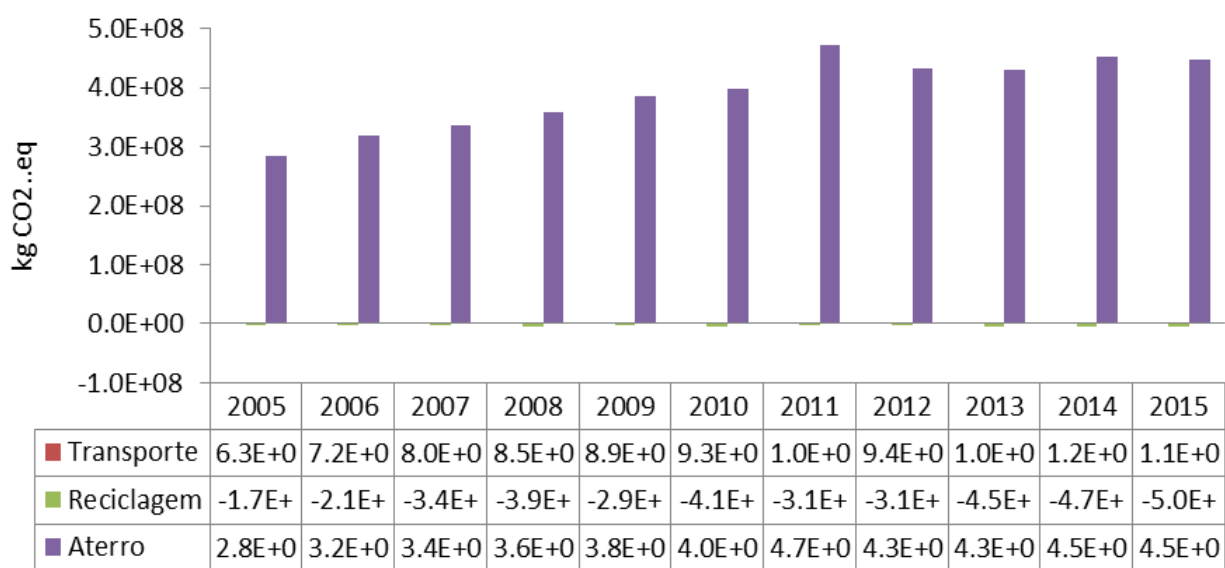


**Figura 12.** Contribuição do programa de coleta seletiva para a categoria aquecimento global, período de 2005 a 2015. Fonte: Autores, 2017.

Analisando a Figura 12, pode-se verificar que para a categoria aquecimento global, em toda a série histórica foi observada uma contribuição positiva, com destaque para o ano de 2011. Esse fato pode ser compreendido pela expressiva coleta de materiais recicláveis ocorrida neste ano (Figura 4) e, conseqüentemente, um maior número de resíduos dispostos no aterro sanitário. Verifica-se na Figura 13, que a etapa do aterro sanitário foi que mais contribuiu para a emissão de poluentes para essa categoria.

Garcia (2016) constatou em seu estudo que a categoria aquecimento global possui uma relação fortemente influenciada pela etapa do aterro sanitário, sendo esta a etapa a que mais contribuiu para o aquecimento global.

Ibáñez-Fóres (2009) propõe o aproveitamento energético dos gases gerados no aterro como uma alternativa viável para a redução dos gases contribuintes dessa categoria. Para Özeler *et al.*, (2006), uma baixa contribuição de emissão dos gases contribuintes do aquecimento global ocorreu quando foi inserido a digestão anaeróbia antes do aterro sanitário e, uma maior contribuição com a incineração antes do aterro sanitário. Já Alencar (2013) constatou que o encaminhamento do material orgânico para a compostagem é o melhor cenário para a redução da categoria de aquecimento global.

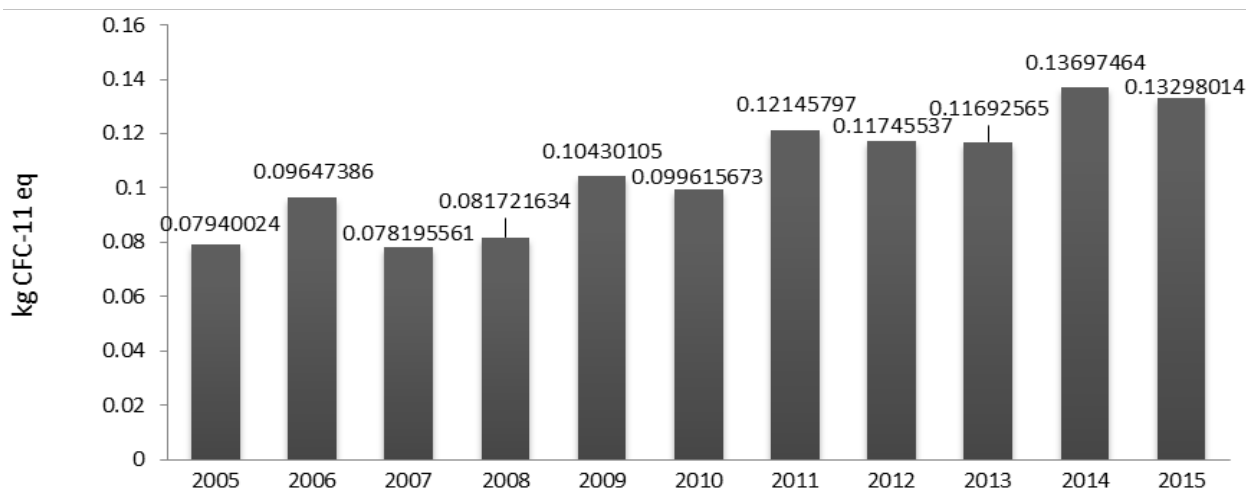


**Figura 13.** Contribuição da etapa transporte, reciclagem e aterro sanitário para a categoria aquecimento global, período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

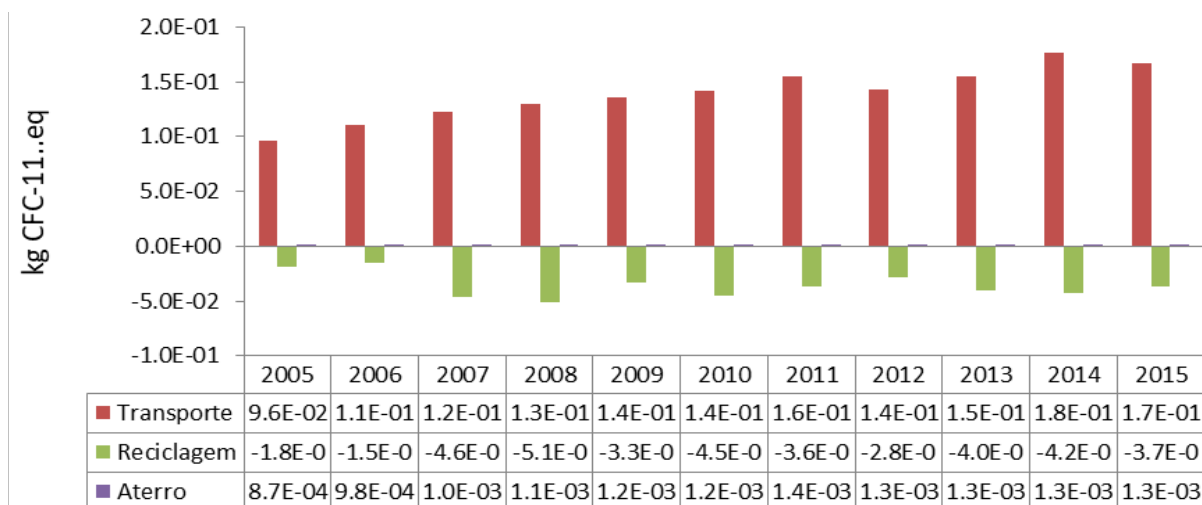
### Categoria Depleção da Camada de Ozônio

A destruição da camada de ozônio ocasiona a elevação da quantidade de raios ultravioletas que alcança a superfície da terra, aumentando os casos de doenças e de diversos danos ao ecossistema (Garrett e Collins, 2009). Na Figura 14, pode-se observar os quantitativos de clorofluorcarbono (CFC) emitidos em todos os anos estudados.

Observa-se na Figura 14, que em toda a série histórica foram geradas contribuições positivas para a categoria depleção da camada de ozônio. Esse fato pode ser justificado pela significativa carga de CFC emitidos na etapa do transporte, como pode ser visualizada na Figura 15. A etapa da reciclagem reduziu a emissão de CFC, mas não suficiente para compensar totalmente a emissão desses gases para o ambiente.



**Figura 14.** Contribuição do programa de coleta seletiva para a categoria depleção da camada de ozônio, período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*



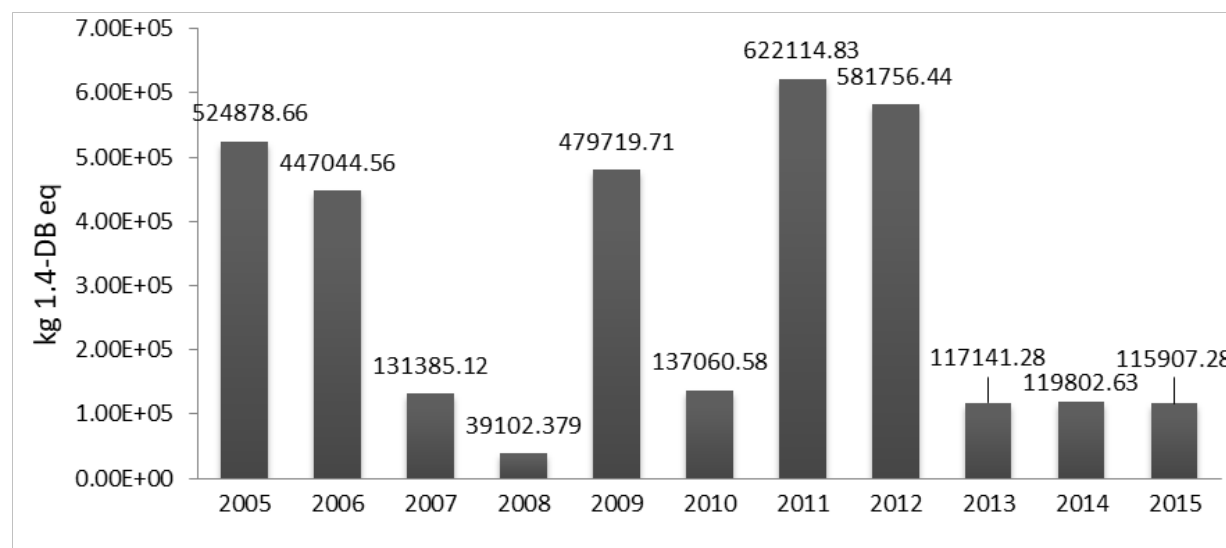
**Figura 15.** Contribuição das etapas transporte, reciclagem e aterro sanitário para a categoria depleção da camada de ozônio, período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

Em estudo desenvolvido por Ibáñez-Fóres (2009) a etapas que mais contribuiram para a categoria depleção da camada de ozônio foram a coleta e o transporte, a reciclagem e a recuperação energética minimizaram as emissões de CFC, contudo, não significativamente para compensar as emissões geradas nas demais etapas. Garcia (2016) também afirma que as etapas de coleta e transporte são as que mais contribuem para este impacto, mas em seu estudo a etapa da reciclagem compensou as emissões de CFC emitidos pelas etapas anteriores.

Alencar (2013) verificou que onde só existe a coleta, transporte e lixão, a quantidade de emissão de CFC é significativamente superior aos demais cenários. Já o cenário que contemplou a etapa da compostagem e o aterro sanitário com coleta e queima de 50% dos gases, favoreceu uma redução do potencial de depleção da camada de ozônio.

### Categoria Toxicidade Humana

De acordo com Leme (2010), a categoria de toxicidade humana decorre das atividades antrópicas que lançam substâncias altamente tóxicas para a atmosfera, apresentando potencial de atingir o ser humano pela sua exposição ao ambiente. Na Figura 16, são apresentadas as contribuições geradas pelas etapas de coleta seletiva para a categoria toxicidade humana na série histórica estudada.



**Figura 16.** Contribuição do programa de coleta seletiva para a categoria toxicidade humana para o período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

Constata-se na Figura 16 contribuições positivas para a toxicidade humana. As maiores contribuições para a categoria ocorreram nos anos de 2005, 2011 e 2012. Esse fato pode ser compreendido pelo aumento do quantitativo coletado e encaminhado para o aterro, principalmente do ano de 2011 que atingiu o maior índice de massa coletada como é possível observar na Figura 4.

Na Figura 17, é comprovado que a etapa do aterro sanitário foi a que mais contribuiu para a toxicidade humana. Pode-se observar que a reciclagem contribuiu para a redução deste impacto, mas esta contribuição não foi significativa para compensar as emissões produzidas no aterro (Martins, 2017).



**Figura 17.** Contribuição das etapas transporte, reciclagem e aterro sanitário para a categoria toxicidade humana, período de 2005 a 2015. *Fonte: Autores, 2017.*

Em seu estudo, Alencar (2013) obteve uma redução de 32% de toxicidade humana, quando avaliou um cenário com aterro sanitário e queima de 50% dos gases produzidos, o cenário lixão e sem queima de gases apresentou os piores resultados para essa categoria. Hong *et al.*, (2015) avaliaram dois cenários, um com tratamento dos resíduos e disposição final adequada e outro com o tratamento dos resíduos sem a disposição final adequada.

Em ambos, foram obtidas elevadas contribuições para a toxicidade humana, tendo o segundo cenário apresentado um pior desempenho para redução do potencial de toxicidade humana, devido ao manuseio incorreto dos equipamentos eletrônicos. Yay (2015), afirma que o cenário com disposição dos resíduos em aterro sanitário sem o reaproveitamento do biogás, obteve-se uma maior toxicidade humana.

## Conclusões

A partir do programa de coleta seletiva diversas emissões de poluentes para a atmosfera foram reduzidas no decorrer dos anos. A categoria acidificação teve emissão negativa em todos os anos avaliados e mesmo com a emissão de gases pela queima do combustível durante a etapa de transporte, a redução de gases pela etapa da reciclagem se mostrou superior a essas emissões nesta categoria. Para a eutrofização só o ano de 2015 apresentou emissões negativas, uma vez que neste ano os quantitativos recolhidos pela reciclagem foram superiores aos demais anos.

Para as categorias oxidação fotoquímica, aquecimento global, depleção da camada de ozônio e toxicidade humana as reduções na emissão de poluentes na etapa da reciclagem não foram suficientes para que estas categorias não gerassem impactos ao meio ambiente. Dessa forma, deve-se buscar mecanismos que visem otimizar o programa de coleta seletiva do município e o reaproveitamento dos gases produzidos no aterro sanitário.

### Agradecimentos

*Este artigo é parte da dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba – PPGECAM/UFPB. Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo, a Autarquia de Limpeza Urbana da Prefeitura Municipal (EMLUR) e a Universidade Jaume I (UJI) que possibilitaram o desenvolvimento desse estudo.*

### Referências bibliográficas

- Alencar, J. C. (2013) *Diagnóstico e Inventário de Ciclo de Vida do Sistema de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Imperatriz – MA*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (Gestão e Tecnologia Ambiental), Universidade de Santa Cruz do Sul, 94pp.
- Araújo, M. G. *Modelo de Avaliação do Ciclo de Vida para a Gestão de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil*. 2013. 232 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019*. Acessado em: 28 de abril de 2020, disponível: <https://abrelpe.org.br/panorama>
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) *NBR 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estruturas*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) *NBR 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações*. Rio de Janeiro.
- Bovea, M. D., Powell, J. C. (2006) Alternative scenarios to meet the demands of sustainable waste management. *Journal of environmental management*. **79**(2), 115-132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.06.005>
- Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, A., Colomer-Mendoza, F. J. (2010) Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management*, **30**, 2383-2395.
- Brasil. *Lei n. 12 305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Acessado em: 20 de maio de 2020, disponível: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm).
- Chi, Y., Dong, J., Tang, Y., Huang, Q., Ni, M. (2014) Life cycle assessment of municipal solid waste source-separated collection and integrated waste management systems in Hangzhou, China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **17**(4), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0300-8>
- Coelho, T. R., Hino, M. R. M. C., Vahldick, S. M. (2019). O The use of ICT in the informal recycling sector: The Brazilian case of Relix. *Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries*; **85**(12078), 1-12. <https://doi.org/10.1002/isd2.12078>
- Costa, I. M., Dias, M. F. (2020) Evolution on the solid urban waste management in Brazil: A portrait of the Northeast Region. *Energy Reports*, **6**(1), 878-884. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.033>
- Chehebe, J.R.B.(1997) *Análise do Ciclo de Vida de Produtos - Ferramenta Gerencial da ISO 14.000*. Rio de Janeiro: Quality mark, 104 pp.



- CML (2001) *CML 2 baseline method*. University of Leiden, Acessado em: 30 de junho de 2018. Disponível: <http://www.leidenuniv.nl/cml/index.html>.
- Durán, C. E. S., Messina, S. (2019) Urban Management Model: Municipal Solid Waste for City Sustainability. In Saleh, Hosam M. (Eds.), *Municipal Solid Waste Management*, IntechOpen, 1-9 pp. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82839>
- EMLUR, Autarquia Municipal Especial de Limpeza Urbana (2017) *Relatório de Atividades Anual*. João Pessoa, 2000 - 2017. Acessado em: 12 de maio de 2017. disponível em: <https://www.joaopessoa.pb.gov.br/secretaria/emlur>
- Foolmaun, R. K., Ramjeeawon, T. (2013) Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**(1), 155-171. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0447-2>
- Garcia, H. R. M. (2016) Avaliação do ciclo de vida socioambiental do programa de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares do município de João Pessoa/PB, Brasil. Estudo de caso: núcleo do Bessa, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Saneamento Ambiental), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 132 pp.
- Garrett, P., Collins, M. (2009) *Life Cycle Assessment of product stewardship options for mercury containing lamps in New Zealand: final report*, Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand, 171 pp. Acessado em: 10 de abril de 2020, disponível em: <https://environment.govt.nz/publications/life-cycle-assessment-of-product-stewardship-options-for-mercury-containing-lamps-in-new-zealand-final-report>
- Guereca, L.P., Gassó, S., Baldasano, J.M., Jiménez-Guerrero, P. (2006) Life cycle assessment of two biowaste management systems for Barcelona, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, **49**(1), 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.009>
- Hauschild, M., Wenzel, H. (1998) *Environmental Assessment of Products*. Scientific background, vol. 2. Scientific background, UK.
- Hong, J., Shi, W., Wang, Y., Chen, W., Li, X. (2015) Life cycle assessment of electronic waste treatment. *Waste Management*, **38**, 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.022>
- Ibáñez-Forés, V. (2009) Optimización del Sistema de Gestión de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de Castellón de la Plana Mediante La Aplicación de Técnicas de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Proyecto Final de Carrera Escola Superior de Tecnologia i Ciències Experimentals (Enginyeria Industrial) – Universitat Jaume I, 231 pp.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020). Cidades@. Acessado em: 05 de abril de 2020. disponível: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/joaopessoa/panorama>
- IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012) *Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: relatório de pesquisa*. Acessado em: 06 de outubro de 2019. disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=17247](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=17247)
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., Van woerden, F. (2018) *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development. Washington, DC: World Bank. 272 pp.
- Khandelwal, H., Dhar, H., Thalla, A. K., Kumar, S. (2019) Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. *Journal of Cleaner Production*, **209**(1), 630-654. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.233>
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E. Hauschild, M, Z, Christensen, T. H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: lessons learned and perspectives. *Waste Management*, **34**(3), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- Leme, M. M. V. (2010) *Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, 138 pp.
- Martins, W. A. (2017) *Avaliação do ciclo da vida do programa de coleta seletiva do Município de João pessoa- PB, Brasil*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 113 pp.

- Mendes, N. C. (2013) Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia (Produção do Espaço Geográfico), Universidade Estadual de São Paulo, 165 pp.
- Mersoni, C. (2015) Avaliação do ciclo de vida como técnica de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Garibaldi/RS. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências, Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, 152pp.
- Município de João Pessoa/PB. (2014) *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de João Pessoa*. Diagnóstico. Acessado em: 28 de abril de 2020. Disponível em: <http://issuu.com/pmjponline/docs/diagnostico>
- Oliveira Neto, G. C., Correia, A. J. C., Schroeder, A. M. (2017) Economic and environmental assessment of recycling and reuse of electronic waste: Multiple case studies in Brazil and Switzerland. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.011>
- Özeler, D., Yetis, Ü., Demirer, G.N. (2006). Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. *Environment International*, 32(3), 405 – 411. doi.org/10.1016/j.envint.2005.10.002.
- Pimentel, C. H. L., Nóbrega, C. C., Jucá, J. F. T., Pimentel, U. H. O., Martins, W. A. (2020) A gestão das rotas tecnológicas de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB. *Brazilian Journal of Development*, 6(2), 7063-7088 <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-126>
- Popita, G-E., Baciú, C., Rédey, Á., Frunzeti, N., Ionescu, A., Yuzhakova, T., Popovici, A. (2017) Life Cycle Assessment (LCA) of municipal solid waste management systems in cluj county, Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*. 16 (1), 47-57. disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Calin-Baciú/publication/316146566\\_Life\\_cycle\\_assessment\\_LCA\\_of\\_municipal\\_solid\\_waste\\_management\\_systems\\_in\\_Cluj\\_county\\_Romania/links/58f25beb](https://www.researchgate.net/profile/Calin-Baciú/publication/316146566_Life_cycle_assessment_LCA_of_municipal_solid_waste_management_systems_in_Cluj_county_Romania/links/58f25beb).
- Ramachandra, T. V., Bharath, H. A., Kulkarni, G., Han, S. S. (2018) Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 1122-1136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.085>
- Rigamonti, L., Grosso, M., Sunseri, M. C. (2009) Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 411–419.
- Tarantini, M., Dominici, L. A., Eleonora, C., Ferdinando, F. (2009) Life Cycle Assessment of waste management systems in Italian industrial areas: Case study of 1st Macrolotto of Prato. *Energy* 34(5), 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.12.004>
- Trentin, A. W. S. (2015) *Diagnóstico e avaliação do ciclo de vida do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Santa Cruz do Sul-RS*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (Gestão e Tecnologia Ambiental), Universidade de Santa Cruz do Sul, 114 pp.
- Yadav, P., Samadder, S.R. (2018) Environmental impact assessment of municipal solid waste management options using life cycle assessment: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 838–854. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0439-7>
- Yay, A. S. E. (2015) Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, 94(1), 284 - 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>
- Zaman, A. U. (2013). Life cycle assessment of pyrolysis–gasification as an emerging municipal solid waste treatment technology, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 1029–1038. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>