

Análisis de ciclo de vida de residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario con y sin generación de energía en ciudades de medio porte

Aline Isabel Melo Henriques¹

Jairo Tamaris Contreras²

RESUMEN

Considerándose la necesidad de profundizar en el conocimiento de la gestión de Residuos sólidos Urbanos (RSU) y sus efectos en el medio ambiente, este trabajo buscó contribuir al aprovechamiento energético de RSU analizando diferentes rutas. Fueron utilizadas las características de los residuos sólidos del consorcio intermunicipal de los municipios de la Micro-región del Alto de Sapucaí (CIMASAS) conformado por 11 municipios brasileiros del Estado de Minas Gerais - Brasil, donde se compararon 2 escenarios utilizando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), escenario 1 (escenario de referencia) – relleno sanitario sin recuperación energética y quema en flares; el escenario 2 – relleno sanitario con recuperación energética en Motores de Combustión Interna (MCI). Considerando los impactos ambientales generados en todo el ciclo de vida de cada escenario, para ello en la evaluación ambiental se consideraron como entradas, materiales y energía, y como salidas las emisiones y productos generados, se utilizó el método CML IA Baseline, del software SimaPro, para el análisis de categorías de impacto (calentamiento global, agotamiento de los recursos abióticos, destrucción de la capa de ozono, acidificación y eutrofización). Los resultados principalmente indican mejor desempeño ambiental en el escenario 2 relleno sanitario recuperando energía eléctrica, además de presentar beneficios por la generación de energía, presenta los menores impactos. El escenario 1 es el modelo más utilizado para el tratamiento y disposición final para los RSU implementados en Brasil es el de peor desempeño desde el punto de vista ambiental. Las categorías de menores impactos para todos los escenarios son la depleción abiótica, seguido de la acidificación y la eutrofización. El calentamiento global se ve influenciado por las emisiones fugitivas de los rellenos sanitarios, sin embargo, es menor el escenario 2 por el uso para generación de energía eléctrica.

Palabras claves: ACV, relleno sanitario, biogás, eficiencia energética, RSU.

ABSTRACT

Different routes are analyzed to obtain more detailed information on the management of Municipal Solid Waste (MSW) and its effects on the environment. The solid waste characteristics of the intermunicipal consortium of the municipalities of the Alto de Sapucaí Micro-region (CIMASAS) made up of 11 Brazilian municipalities of the State of Minas Gerais - Brazil were used, where 2 were compared using the Life Cycle Analysis (LCA), Scenario 1 (reference scenario). Scenario 2 - sanitary landfill with energy recovery in Internal Combustion Engines (MCI). Consider the environmental effects generated throughout the life cycle of each scenario, for use in environmental assessment as inputs, materials and energy, such as the results generated, the CML IA Baseline method, the SimaPro software for the analysis of impact categories (global warming, depletion of abiotic resources, destruction of the ozone layer, acidification and eutrophication). The results are, mainly, better environmental results in the scenario. Scenario 1 is the most used model for the treatment and the final disposal for the SUW implemented in Brazil is the worst performance from the environmental point of view. The categories of minor effects for all scenarios are abiotic depletion, acidification and eutrophication. Global warming is influenced by fugitive emissions from landfills, however it is lower in scenario 2 because of the use for generating electricity.

Keywords: LCA, landfill, biogas, energetic efficiency, MSW

¹ Bióloga. M.s.C. Ingeniería de Energía, Semillero de Investigación del Centro Acuicola y Agroindustrial de Gaira-CAAG, SENA Regional Magdalena, ameloh@misena.edu.co

² Administrador de Empresas. Esp. En Docencia Universitaria, Semillero de Investigación del Centro Acuicola y Agroindustrial de Gaira-CAAG-SENA-Regional Magdalena, jtamarisc@sena.edu.co.

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son una preocupación a nivel mundial, inevitablemente generados por las actividades de la población; y el crecimiento poblacional lleva también a un consumo desmedido de recursos naturales (ACHILLAS et al., 2011, CLEARY, 2009). Una problemática relacionada con la disposición final de los RSU y el hecho de que los mismos cuando descartados de la forma incorrecta generan impactos negativos sobre el medio ambiente que afectan la salud humana.

Los países miembros de la Unión Europea están aplicando leyes para reducir la disposición de RSU en los vertederos y promover el uso de técnicas ambientalmente menos comprometedoras (MÜNSTER & LUND, 2009). Esto debido a las grandes áreas ocupadas por ellos y los impactos ambientales derivados de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a partir de los gases fugitivos, la contaminación de las aguas subterráneas y del suelo (EUROSTAT, 2014).

En el Plan Nacional de Residuos Sólidos la prevención de la formación y la reducción de los residuos son importantes y deben priorizarse antes de la recuperación del recurso en la jerarquía. Lisney et al. (2003) abordan la recuperación de energía como necesaria para la gestión sostenible de los residuos. En la selección de alternativas para la disposición final de los residuos es importante considerar los riesgos derivados de la implementación de cada una y los impactos ambientales que pueden ser causados (FRUERGAAARD y ASTRUP, 2011), con este fin se utiliza el análisis del Ciclo de Vida (ACV) que ha demostrado ser una

herramienta adecuada para proporcionar una comparación entre las tecnologías de gestión de residuos. Desde el punto de vista ambiental, los procesos de gestión sostenible de los residuos, deben conducir a la disminución de la generación de GEI, es por eso que se utilizan los procesos de conversión de residuos en energía WtE que disminuyen y reemplazan el uso de combustibles fósiles.

La mayoría de los estudios se han centrado en comparaciones entre tecnologías específicas como son la incineración, gasificación y rellenos sanitarios, las más comunes de encontrar en los grandes núcleos poblacionales. Sin embargo, todavía hay la necesidad de un estudio exhaustivo sobre la viabilidad de las estrategias WtE para RSU en ciudades de mediano porte. El objetivo de este trabajo es la evaluación energético-ambiental comparando un relleno sanitario común y otro generando energía eléctrica a partir de los RSU para poblaciones medianas, incluyendo su conversión energética, y utilizando el análisis del ciclo de vida – ACV.

II. METODOLOGÍA

La metodología abordada en este trabajo permite el análisis y comparación, bajo el aspecto energético y ambiental de la disposición final de los RSU en un relleno sanitario. Como estudio de caso se utilizará el Consorcio Intermunicipal de los Municipios de la Microrregión del Alto Sapucaí (CIMASAS), en el estado de Minas Gerais en Brasil.

A. Datos de entrada

En una primera fase, se consideraron como datos de entrada la generación de RSU, la composición gravimétrica y elemental de los RSU, así como

el pretratamiento y tratamiento necesario, posibilidad de recuperación energética, uso de materiales básicos y las emisiones generadas durante la vida útil del proyecto.

B. Relleno Sanitario de Itajubá

El relleno sanitario se encuentra ubicado en el municipio de Itajubá, en la región Sur del estado de Minas Gerais, a 12 km del centro de la ciudad. Posee un área de 56,9 hectáreas, con vida útil de proyecto de 20 años. El terraplén inició sus operaciones en enero de 2010 (GONÇALVES, 2007).

C. Población de Estudio

La población seleccionada se encuentra entre 100.000 y 300.000 habitantes. Según BNDES (2014), la ruta recomendada para municipios de este tamaño incluye: (i) recolección domiciliar de residuos no reciclables; (ii) recolección diferenciada de residuos reciclables y orgánicos de grandes generadores; (iii) transporte a la unidad de pretratamiento para la clasificación de los residuos reciclables secos y disposición final de aquellos materiales no aprovechables en rellenos sanitarios. El consorcio CIMASAS está formado por 11 municipios del estado de Minas Gerais con un tamaño poblacional estimado en 203.983 habitantes (IBGE, 2015).

D. Evaluación de Impacto

De los diversos métodos de AICV disponibles en el software SimaPro v8, se eligió el método CML IA baseline (2000), debido a que la mayoría de las categorías de impacto tienen un ámbito geográfico global, además su enfoque se orienta al problema que corresponde ISO al punto intermedio en el mecanismo ambiental, donde todavía se pueden proponer soluciones de mitigación a las diferentes problemáticas ambientales.

La herramienta elegida para el presente estudio es el Sistema de medición y mejora de la productividad (SimaPro v8.0), un modelo de software desarrollado por la empresa holandesa Pre-Consultants, fue utilizado para hacer los cálculos, análisis y comparaciones de los impactos ambientales en los escenarios analizados, es una herramienta ampliamente utilizada en la ACV, tanto por profesionales e investigadores.

Las categorías de impacto intermediarias utilizadas para realizar la evaluación de los impactos ambientales de los escenarios analizados son: acidificación, calentamiento global, eutrofización, depleción abiótica y depleción de la capa de ozono. La justificación para la selección es tal que representan las principales categorías esos impactos ambientales por parte del sector de tratamiento y disposición de RSU.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización y composición de los RSU en estudio.

Como no existen datos recientes reportados en la literatura sobre la composición gravimétrica de los RSU depositados en el relleno de Itajubá, se investigaron ciudades con población de mediano porte como del presente estudio en Brasil, teniendo en cuenta el PIB per cápita y de esta forma se obtuvo la composición gravimétrica media que fue asumida para las CIMASAS (Figura 1).

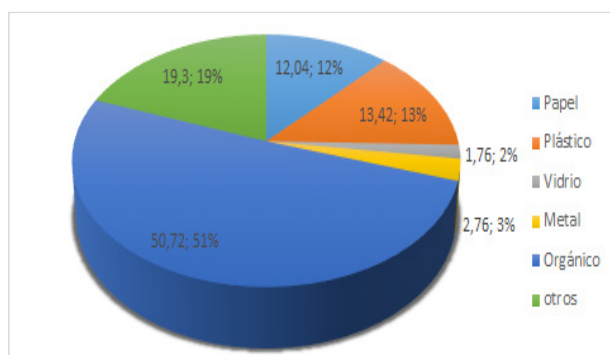


Figura 1. Composición gravimétrica asumida para CIMASAS, 2015

B. Estimación de generación de biogás de relleno sanitario en CIMASAS

Para la estimación de la generación de biogás de relleno se utilizó el programa LandGEM®, desarrollado por la agencia estadounidense de protección ambiental (USEPA, 2005), el cual presenta las estimaciones de emisión para todos los gases o contaminantes para un único año especificado. En la Figura 2, se presenta la generación de biogás, metano y otros gases que se presentan en menores cantidades. Se puede observar que después de 2034 el año de cierre del relleno, ocurre el pico de la producción de biogás.

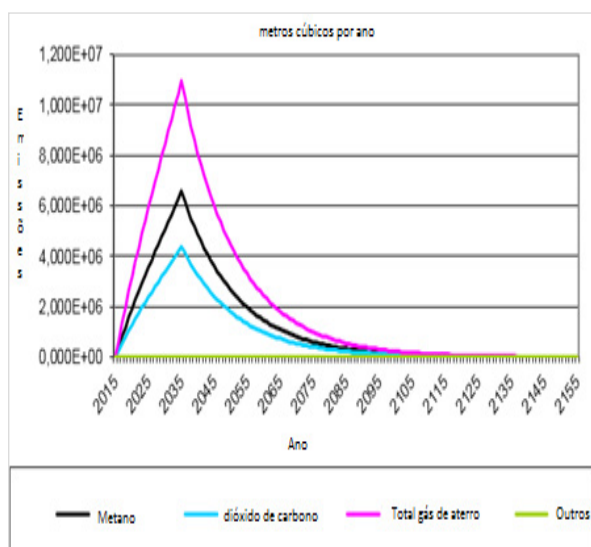


Figura 2. Estimativas de generación de biogás y metano a partir de LandGEM

C. Análisis Ambiental

Para el análisis ambiental se realizó una evaluación de ciclo de vida, considerando como unidad funcional 1 tonelada de RSU y el flujo de referencia es la entrada a los límites de sistema y la salida en flujos de masa, energía y emisiones al ambiente.

1. Escenario 1. Relleno Sanitario sin recuperación de energía y quema de biogás en flare.

Es la alternativa utilizada actualmente para la disposición final de los residuos del consorcio CIMASAS. En este caso, el 100% del residuo recolectado está dispuesto en el relleno sanitario y el biogás generado se dirige hacia el flare, no habiendo recuperación energética.

De manera simplificada, un vertedero de residuos sólidos puede ser considerado un reactor biológico donde las principales entradas son los RSU, diésel para el transporte y compactación del suelo, arena y la arcilla para cobertura de la masa (formación de la célula sanitaria). El sistema de producto considerado en el presente estudio contempló las siguientes unidades de proceso: relleno sanitario (tratamiento principal), tratamiento de lixiviados (lagunas facultativas), sistema de captación y quema del biogás.

La Figura 3 representa los límites del sistema con las principales entradas y salidas para este escenario. Se consideró que del biogás producido el 25% es lanzado a la atmósfera en forma de emisiones fugitivas y el restante 75% se quema en flare (DI TRAPANI et al., 2013, PARK y SHIN, 2001), pero algunos autores consideran que estos valores podrían ser mayores y alcanzar

40 – 60 % (ASSAMOI, B. e LAWRYSHYN, Y, 2012; AMINI AND REINHART, 2011; AMINI ET AL., 2012; SCHNEIDER ET AL., 2012; THEMELIS AND ULLOA, 2007).

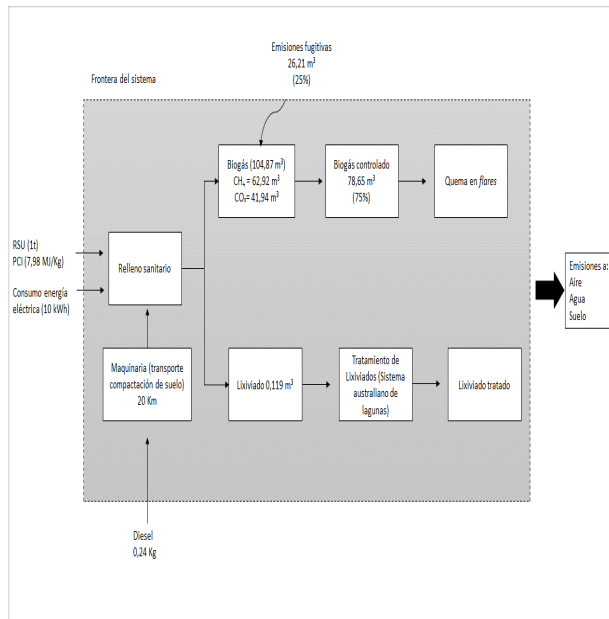


Figura 3. Fronteras del Sistema en el escenario 1.

2. Escenario 2. Relleno Sanitario con recuperación energética en MCI

El Escenario 2 es similar al Escenario 1 con la diferencia de que en este caso se considera la generación de energía eléctrica a partir del biogás captado por el sistema de recolección (ver Figura 4), el 75% del biogás generado es utilizado para generación de energía eléctrica en motores de combustión interna (MCI) y el 25% restante no se aprovecha debido a las emisiones fugitivas. Las emisiones evitadas se calculan con base en la sustitución de electricidad generada en el sistema eléctrico de Brasil por la producida a partir de gas de relleno en los MCI por aquella.

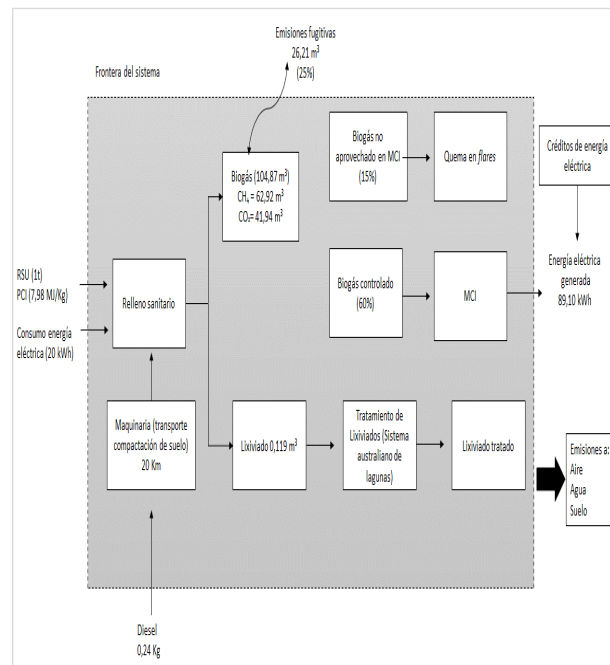


Figura 4. Fronteras del sistema en el Escenario 2

D. Análisis del inventario de ciclo de vida (AICV)

Los inventarios obtenidos a partir de fuentes brasileñas y de la base de datos de ECOINVENT se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Fuente de datos para inventarios de ACV en los escenarios

	Entradas	Referencia Inventarios
Escenarios 1, 2	Electricidad	Banco de datos Ecoinvent (2015)
Escenarios 1 e 2	Diésel para operación de la maquinaria de compactación del suelo	Borges (2004)
	Arcilla	Banco de datos Ecoinvent (2015)
	Arena	Banco de datos Ecoinvent (2015)
	Biogás de aterro sanitario	(LANDGEM, v302)
	Emisiones de chorume del relleno sanitario	BASTOS <i>et al.</i> (2003); SOUTO e POVINELLI, (2007) en NAKAMURA, (2012); DIAS (2012); VON SPERLING (2014)
Escenario 1	Emisiones de gases durante a quema del biogás en flare	USEPA (2008), NSCA (2002) en BEYLOT <i>et al.</i> (2013)
Escenario 2	Emisiones del Motor de Combustión Interna	USEPA (2008), NSCA (2002) en BEYLOT <i>et al.</i> (2013).

E. Evaluación de los Impactos Ambientales para los Escenarios Evaluados

Para el análisis ambiental, se compararon los escenarios, para las categorías de midpoint. Para comparaciones, vale recordar que los valores más altos indican un peor comportamiento ambiental del escenario en la categoría, mientras que los valores menores o negativos indican beneficios ambientales (Ver Figura 5).

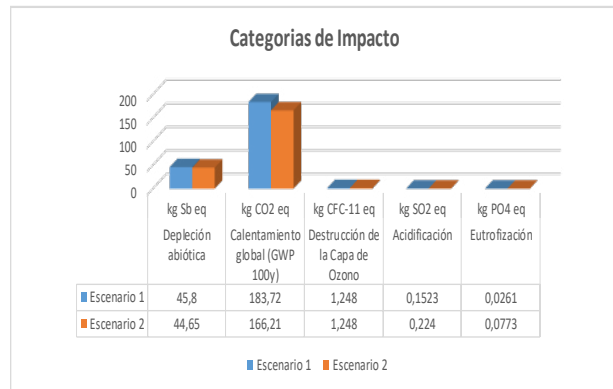


Figura 5. Impactos ambientales obtenidos con el método CML IA Baseline

1. Caracterización del Escenario 1 (Relleno Sanitario convencional)

Para el Escenario 1, presentado en la Figura 6, los impactos ambientales son influenciados en todas las categorías de impactos especialmente por la quema en flare del biogás de vertedero y por las emisiones fugitivas, presentando estas el mayor valor para el calentamiento global con 183.72 kg de CO2 eq / tRSU.

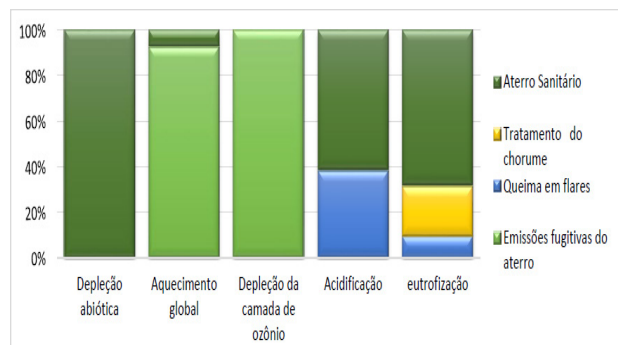


Figura 6. Comparación porcentual de la caracterización de los impactos para el escenario 1, relleno sanitario con quema en flare.

Los mayores impactos del relleno sanitario están relacionados con la depleción abiótica, debido al uso de recursos tales como la ocupación del suelo (dadas las grandes extensiones de tierra),

uso de arcilla y arena para compactación de los RSU, así como el uso de la maquinaria. En cuanto a la destrucción de la capa de ozono, se puede observar el mayor impacto de las emisiones fugitivas, ya que se desplazan a la atmósfera, degradando la capa de ozono, principalmente por los componentes del biogás, tales como el Hidroclorofluorcarbano (HCFC), Clorofluorocarbano (CFC) y el bromuro de metilo, sustancias controladas por el Protocolo de Montreal y que se denominan sustancias destructoras de la capa de ozono.

Caracterización del Escenario 2 (Relleno Sanitario con Recuperación Energética en MCI)
 Para la caracterización del Escenario 2, mostrado en la Figura 7, así como en el Escenario 1, los mayores impactos son presentados por las emisiones fugitivas, pero en este escenario hay generación de energía eléctrica. Se puede observar la influencia de los impactos ambientales en la etapa de generación de energía con MCI, principalmente para la acidificación y la eutrofización por las emisiones de NOx, CO, entre otros. Los valores negativos representan impactos positivos, debido a la generación evitada de energía eléctrica que, a su vez, disminuye el consumo de recursos naturales y de electricidad de la red eléctrica brasileña, y consecuentemente reduciendo el impacto en la depleción abiótica, en el calentamiento global, en la acidificación y eutrofización.

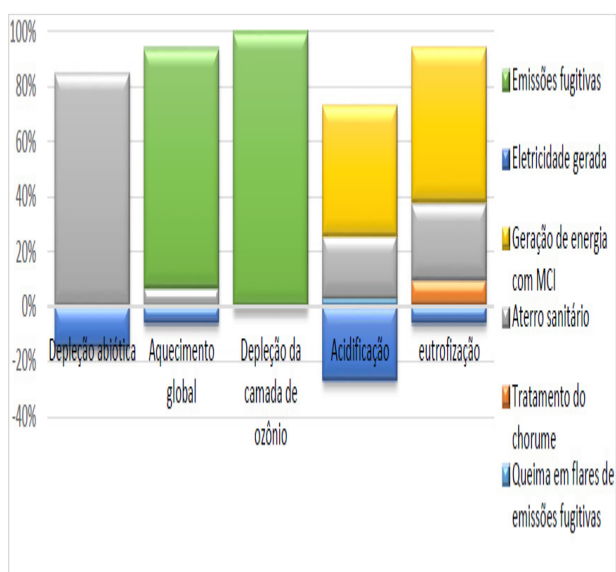


Figura 7. Comparación porcentual de la caracterización de los impactos para el Escenario 2

IV. CONCLUSIONES

El escenario 1 es el modelo más utilizado para el tratamiento y disposición final para los RSU implementados en Brasil y Colombia es el de peor desempeño desde el punto de vista ambiental. Debido a que los mayores impactos para todas las categorías se presentaron en ese escenario, considerando esta problemática ambiental en varios países Europeos se establecen políticas para erradicar los rellenos sanitarios y enfocan sus esfuerzos en la implementación de la jerarquía de tratamiento y disposición del residuo, disminución de residuos, recuperación y reciclado de los materiales y de la energía contenidos en el mismo. Los vertederos en su actual concepción generan una carga incalculable para las futuras generaciones y deben considerarse como última opción para disponer de los residuos.

Para el escenario 2 se disminuye el impacto de calentamiento global debido a la recuperación

de energía generada por los MCI, sin embargo no son una alternativa viable al revisar el resto de impactos los cuales se presentan muy similares con respecto al relleno sanitario convencional, esto se debe principalmente al uso de MCI y a las emisiones fugitivas también generadas.

Podemos concluir que el relleno sanitario aunque es el sistema más utilizado para disposición final de los residuos sólidos no es el mejor método, debido a los impactos ambientales generados, se debe continuar en la búsqueda de alternativas más amigables con el medio ambiente considerando, para municipios con población entre 100.000 y 300.000 habitantes debería estar compuesta por: recolección domiciliar de CDR, recolección diferenciada de residuos reciclables, orgánicos, unidades de clasificación para destinación de los residuos reciclables secos y disposición de desechos en rellenos sanitarios.

V. REFERENCIAS

- ACHILLAS CH, VLACHOKOSTAS CH, MOUSSIOPOULOS N, BANIAS G, KAFETZOPOULOS G, KARA-GIANNIDIS A. Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area. *Resource Conservation Recycling*. 2011;55 (9–10):857–63.
- AMINI, H.R., REINHART, D.R., 2011. Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. *Waste Management*. v31, 2020–2026.
- AMINI, H.R., REINHART, D.R., MACKIE, K.R., 2012. Determination of first - order landfill gas modeling parameters and uncertainties. *Waste Management*. v.32, 305 – 316.
- ARAFAT A, K., JIJAKLI A, A., AHSAN. Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. *Journal of Cleaner Production*. (105) 233-240. 2015.
- BANAR, M, Z. COKAYGIL, A. OZKAN. Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. *Waste Management* (29) 54–62. Turkey. 2009
- BARROS, R. M., TIAGO, G., DA SILVA, T. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*. V. 65, p. 150-164, Ed. Elsevier, 2014.
- BECK, R. W. Anaerobic Digestion Feasibility Study. Bluestem Solid Waste Agency e Iowa Department of Natural Resources. [s.n.]. 2000.
- BEYLOT, A.; VILLENEUVE, J.; BELLENFANT, G. Life Cycle assessment of landfill biogas management: sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste management*, New York, N.Y., v. 33, n. 2, p. 401-411, fev. 2013
- BERNSTAD e LA COUR JANSEN. Review of comparative LCAs of food waste management systems current status and potential improvements. *Waste Management*. 32(12):2439-55. 2012.
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Fundação de apoio ao desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE. 2013.
- BOSMANS, A., VANDERREYDT, I., GEYSENC, D., HELSEN, L. The crucial role of waste to energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. *Journal Cleaner Production* 55, 10–23. 2013.

- BRUNNER, P.H., RECHBERGER, H. Waste to energy – key element for sustainable waste management. *Waste Management*. 37, 3–12. 2015.
- CLIFT, R., DOIG, A., FINNVEDEN, G., 2000. The application of life cycle assessment to integrated solid waste management. *Process safety and environmental protection*. Transactions of the Institution of Chemical Engineers 78 (4), 279– 287.
- CHAYA, W., GHEEWALA, S. Life cycle assessment of MSW-to-energy schemes in Thailand. *Journal Cleaned Production* 15 (15), 1463e1468. 2007.
- CHEHEBE, J. R. Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. São Paulo: Qualitymark, 1998
- CHERUBINI F, BARGIGLI S, ULGIATI S. Life cycle assessment (LCA) of wastemanagement strategies: landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*. 2009;34(12):2116–23.
- CHERUBINE, BARGIGLI, e SERGIO ULGIATI. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*. (34) 2116–2123. Roma. 2008.
- CONSONNI. S., GIUGLIANO, M., GROSSO M. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste Part A: Mass and energy balances. *Waste Management*. Italia. 2005.
- ECOINVENT, 2015. Swiss center for life cycle inventories (Ecoinvent Centre). Ecoinvent Database. Ecoinvent Centre, Dübendorf, 2010. Disponível em: www.ecoinvent.org
- EUROSTAT, Greenhouse gas emissions from waste disposal. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Green-](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Greenhouse_gas_emissions_from_waste_disposal)
- house_gas_emissions_from_waste_disposal. 2014.
- KHOO HH. Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies. *Waste Management* 2009; 29(6):1892–900.
- OLIVEIRA, L. B.; MAHLER, C. F.; ROSA, L. P. Waste to Energy in Brazil. In: KARAGIANNIDIS, A. *Waste to Energy - Opportunities and Challenges for Developing and Transition Economies*. Springer, p. 341-348. [s.n.], ISBN 978-1-4471-2305-7. 2012.