



# Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

## Tropical Journal of Environmental Sciences



### Emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterio derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica

Greenhouse Gas and Criteria Pollutants Emissions Derived from Different  
Mitigation Measures in the Management of Solid Urban Waste in the Canton of  
San José, Costa Rica

*Jorge Herrera Murillo<sup>a</sup>, José Félix Rojas Marín<sup>b</sup>, Deivis Anchia Leiton<sup>c</sup>*

<sup>a</sup> Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica,  
[jorge.herrera.murillo@una.cr](mailto:jorge.herrera.murillo@una.cr)

<sup>b</sup> Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica,  
[jose.rojas.marin@una.cr](mailto:jose.rojas.marin@una.cr)

<sup>c</sup> Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica,  
[deivis.anchia.leiton@una.cr](mailto:deivis.anchia.leiton@una.cr)

**Director y Editor:**

Dr. Sergio A. Molina-Murillo

**Consejo Editorial:**

Dra. Mónica Araya, Costa Rica Limpia, Costa Rica

Dr. Gerardo Ávalos-Rodríguez. SFS y UCR, USA y Costa Rica

Dr. Manuel Guariguata. CIFOR-Perú

Dr. Luko Hilje, CATIE, Costa Rica

Dr. Arturo Sánchez Azofeifa. Universidad de Alberta-Canadá

**Asistente:**

Sharon Rodríguez-Brenes

**Editorial:**

Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica (EUNA)





# Emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterio derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica

## Greenhouse Gas and Criteria Pollutants Emissions Derived from Different Mitigation Measures in the Management of Solid Urban Waste in the Canton of San José, Costa Rica

Jorge Herrera Murillo<sup>a</sup>, José Félix Rojas Marín<sup>b</sup>, Deivis Anchia Leitón<sup>c</sup>

[Recibido: 15 de agosto, 2017. Aceptado: 25 de setiembre, 2017. Corregido: 5 de octubre, 2017. Publicado: 01 de enero, 2018]

### Resumen

Se estimaron las emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterio así como el potencial de generación de energía eléctrica para cuatro escenarios distintos de tecnologías para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) del cantón de San José: relleno sanitario, incineración, compostaje y tratamiento mecánico-biológico. Con este fin, se utilizaron los datos de generación y composición de residuos aportados por el Departamento de Servicios Ambientales del municipio capitalino, los cuales sirvieron de insumo para realizar un análisis de ciclo de vida, así como los respectivos flujos de materiales y energía para cada propuesta, a partir de la formulación de los respectivos balances de masa y energía. La disposición final en rellenos sanitarios es el tratamiento que más emisiones de gases efecto invernadero origina con 532,5 t CO<sub>2</sub>e/d y un potencial de generación de energía eléctrica de hasta 73,45 MWh, seguido por la incineración de RSU con 401,9 t CO<sub>2</sub>e /d. Sin embargo, escenarios alternativos como la incineración genera adicionalmente, importantes emisiones de contaminantes criterio del aire como partículas (5,14 t/d), NO<sub>x</sub> (0,75 t/d) y CO (0,13 t/d).

**Palabras claves:** cambio climático, energía, gases efecto invernadero, gestión ambiental municipal, residuos sólidos urbanos.

### Abstract

Greenhouse gas and criteria pollutants emissions as well as the potential for electric power generation were estimated for four different scenarios of final disposal of solid urban waste (MSW) in San Jose: landfill, incineration, composting and mechanical-biological treatment. Generation and composition waste data reported by the San Jose Department of Environmental Services were used as input for a life cycle analysis as well as the respective materials and energy flows for each proposal, based on the formulation of the respective balances of mass and energy. The final disposal in landfills is the treatment that emits more emissions of greenhouse gases with 532.5 t CO<sub>2</sub>e / d and a potential of electricity generation of up to 73.45 MWh, followed by the incineration of MSW with 401.9

a Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, [jorge.herrera.murillo@una.cr](mailto:jorge.herrera.murillo@una.cr)

b Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, [jose.rojas.marin@una.cr](mailto:jose.rojas.marin@una.cr)

c Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica [deivis.anchia.leiton@una.cr](mailto:deivis.anchia.leiton@una.cr)



t CO<sub>2</sub>e / d. However, alternative scenarios such as incineration additionally generate significant emissions of air pollutants such as particulates (5.14 t / d), NO<sub>x</sub> (0.75 t / d) and CO (0.13 t / d).

**Keywords:** Climate Change, energy, greenhouse gases emissions, municipality environmental management, urban solid residues.

## 1. Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) corresponden a todos aquellos que son generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, que resultan de la eliminación de los materiales relacionados con actividades domésticas, embalajes, así como los productos que se consumen y sus recipientes (SEMARNAT, 2006). El crecimiento poblacional, el desarrollo económico y los patrones de consumo derivados del mejoramiento de los estándares de calidad de vida de los habitantes en los centros urbanos, han propiciado un aumento sostenido en las tasas de generación de RSU (Menikpura *et al.*, 2013). Costa Rica no se escapa de esta realidad, de acuerdo con las estadísticas reportadas por el Departamento de Servicios Ambientales de la Municipalidad de San José, el cantón pasó de generar 10 788 ton/mes en el año 2009 a 11 679 ton/mes para el 2015, mostrando una tasa promedio de crecimiento cercana al 1,4 % anual. Un 64,6 % del total de los residuos generados proviene del sector residencial, un 12,8 % del comercio y 14,4 % del aseo de vías (Figura 1). Tanto en el nivel cantonal como nacional, el tratamiento de RSU es incipiente y se continúa con la tendencia a utilizar los rellenos sanitarios y los botaderos para la disposición final de residuos, a pesar de que el incremento en la tasa de generación de RSU está reduciendo considerablemente la vida útil de estos (Soto, 2013). Según datos del Ministerio de Salud, en Costa Rica diariamente se generan 4 000 toneladas de residuos, de las cuales aproximadamente un 75 % llegan a los rellenos sanitarios y vertederos controlados, ya que el 84 % de las viviendas cuenta con servicio de recolección de residuos, en tanto que el 10 % los queman, un 5 % los entierran y el porcentaje restante los dispone inadecuadamente en cuerpos de agua (INEC, 2011).

Al colocar los RSU en un relleno sanitario, la fracción orgánica biodegradable inicia un proceso de descomposición que idealmente comprende cinco fases. La fase I corresponde a la descomposición aerobia, producto de la presencia de pequeñas fracciones de aire atrapadas entre los residuos. En esta se genera mayoritariamente dióxido de carbono, amoníaco y agua (Kiss, 1998). Una vez consumido todo el oxígeno, la descomposición se convierte en un proceso anaerobio (fase II). Esta es conocida con el nombre de fase ácida donde se empieza a dar la generación de lixiviados con altos contenidos de ácidos grasos, mientras que los gases emitidos están constituidos mayoritariamente por dióxido de carbono y nitrógeno no consumido aún. En las fases III y IV, los ácidos son transformados en biogás, por lo que aumenta el pH y disminuye la concentración de lixiviados, alcanzando una concentración variable de la composición del biogás; CH<sub>4</sub> 50-75 % y CO<sub>2</sub> entre 40 % y 50% dependiendo del residuo y el tipo de operación (Hinchliffe, Frommann, & Günsilius, 2017). La experiencia empírica de países desarrollados demuestra que la generación de biogás se aproxima a los 200 m<sup>3</sup> por cada tonelada de RSU



depositada en un relleno sanitario, sin embargo, este dato depende de la composición de los residuos recolectados (Kiss, 2006).

Según datos del inventario de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) de Costa Rica (IMN, 2015) durante el año 2012 se generaron 70 200 t de metano productos de los residuos sólidos enviados a los rellenos sanitarios de los cuales se logró recuperar solamente 16 440 ton. Ante este panorama el desarrollo de estrategias de mitigación de gases efecto invernadero en el sector de residuos sólidos resulta de vital importancia, ya que según los datos del último inventario de GEI este rubro representa un 4,4 % del total de las emisiones, resultando mayor que el promedio mundial de 3,6 % (SEMARNAT, 2009). La disposición de residuos en rellenos sanitarios no solo contribuye a la problemática del calentamiento global, sino que puede generar impactos ambientales negativos para la salud de la población y los ecosistemas naturales, causando contaminación del suelo, de cuerpos de agua y de aire.

El análisis de ciclo de vida es una metodología que permite estimar la carga o los efectos ambientales asociados a una actividad, un producto o un servicio, al partir desde los insumos hasta los residuos generados. Existen dos variantes de este tipo de análisis, la valoración clásica donde el enfoque metodológico está orientado al inventario y la valoración de ciclo de vida, mientras que la técnica rápida está más orientada al análisis de la alternativa. En general, este tipo de análisis se utiliza en la búsqueda de opciones para prevenir la contaminación mediante el diseño al procurar una revisión cuidadosa de los consumos de energía, recursos y descargas ambientales asociadas a los procesos (Komilis y Ham, 2004).

En el presente artículo se analizan diferentes alternativas de disposición final de residuos sólidos para el cantón de San José, se aplica el análisis de ciclo de vida, especialmente desde el punto de vista de reducción de emisiones de GEI y contaminantes criterio, al tomar como base los estudios de tasas de generación y composición de residuos sólidos realizados hasta la fecha.

## 2. Metodología

### 2.1 Definición de información base para los escenarios

Se seleccionaron un total de cuatro alternativas diferentes para el manejo de los residuos sólidos: disposición en rellenos sanitarios (escenario actual), incineración, compostaje y tratamiento mecánico-biológico. El estudio de cada una incluyó las etapas de recolección, tratamiento y disposición final. Cada alternativa fue evaluada desde el punto de vista ambiental se incorporó la estimación de emisiones a través de un análisis de ciclo de vida, flujo de materiales y energía, apoyado en la formulación de los respectivos balances de masa y energía. El análisis de ciclo de vida permite estimar los efectos ambientales generados asociados con una actividad, producto o servicio, desde la obtención de la materia prima hasta la disposición final (Jin, Wang, & Ran, 2006).



## 2.2 Caracterización de la unidad funcional y análisis de ciclo de vida

Se tomó como punto de partida los datos reportadas por el Departamento de Servicios Ambientales de la Municipalidad de San José que se muestran en el **Cuadro 1**. Una vez definidos los datos generales, se procedió al levantamiento de los procesos involucrados en cada alternativa (**Cuadro 2**), se incluyó los aspectos ambientales relacionados únicamente con la generación de emisiones. En el **Cuadro 3**, se puede observar el detalle de las variables incorporadas. El análisis del flujo de materiales y energías en cada etapa, permitió la estimación de la energía útil que se requiere como elemento de entrada, según el tipo de combustible y las emisiones producidas.

**Cuadro 1.** Datos generales utilizados en la caracterización de la unidad funcional

Año base	2015
Cantidad de RSU recolectados diariamente	433 ton
Generación estimada de residuos per cápita	0,66 kghab <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
Composición de los RSU	55,3 % Fracción biodegradable 24,5 % subproductos con potencial para reciclaje 20,2 % residuos sin valor comercial apreciable
Servicio de recolección	Promedio de km recorridos en cada ruta: 38,9 Tiempo promedio de recorrido por ruta: 5 horas con 27 minutos. Total de km recorridos al año: 204 913,7 km

**Fuente:** Departamento de Servicios Ambientales-MSJ, (2016)

**Cuadro 2.** Descripción de los procesos incluidos en cada alternativa evaluada

Insumos (entradas)	Actividad primaria	Aspectos/impactos (salidas)
Combustible para el transporte (diésel)	Recolección y transporte de residuos	-Emisiones por el uso de combustibles (CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , hidrocarburos y partículas) -Generación de energía útil
-Combustibles: diésel y GLP -Residuos a incinerar	Incineración de residuos	-Emisiones: CO, SO <sub>2</sub> , NOx, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , partículas, metales pesados, dioxinas y furano -Generación/recuperación de calor y energía útil
-Residuos orgánicos -Energía eléctrica -Agua	Compostaje de residuos	-Emisiones: CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> -Lixiviados -Generación de compostaje
-Residuos orgánicos e inorgánicos -Energía eléctrica -Combustible: diésel, GLP	Tratamiento mecánico biológico	-Emisiones: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> -Lixiviados -Generación de compostaje y materiales de postratamiento -Generación/recuperación de biogás
-Residuos totales -Combustible para viajes en el sitio	Disposición en rellenos sanitarios	-Emisiones: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, compuestos orgánicos volátiles -Lixiviados -Generación/recuperación de biogás



**Cuadro 3.** Variables ambientales destacadas en cada alternativa

	Recolección	Alternativas de tratamiento/disposición final			
		Relleno sanitario	Incineración	Compostaje	Tratamiento mecánico
<b>Entradas</b>					
Diésel	X	X	X		X
Energía eléctrica				X	X
<b>Salidas</b>					
<b>Emisiones GEI</b>					
CO <sub>2</sub>	X	Y	X	Y	Y
CH <sub>4</sub>		Y		Y	Y
<b>Otras emisiones</b>					
CO	X	X	XY	Y	X
H <sub>2</sub> S		Y			
NO <sub>x</sub>	X	X	XY		X
SO <sub>2</sub>	X	X	XY		X
Hidrocarburos	X	X	X		X
Partículas	X	X	XY		X
Metales			Y		
Dioxinas y furanos			Y		

**X variables de operación del proceso**

**Y variables vinculadas al tratamiento de los residuos**

Fuente: Basado en Nieto (2014)

## 2.3 Estimación de las emisiones

### 2.3.1 Proceso de recolección

La ecuación básica utilizada para la estimación de las emisiones de los vehículos automotores que participan en las etapas de recolección de residuos involucra los datos de actividad vehicular y un factor de emisión, de acuerdo con la ecuación 1.

$$E_p = KRV \times FE_p \quad (1)$$

Donde:

Ep= Emisiones totales del contaminante p

KRV= Kilómetros recorridos por el vehículo

FEp = Factor de emisión del contaminante p

Para los vehículos recolectores, los datos de actividad se refieren a los kilómetros recorridos por vehículo (KRV), los cuales fueron reportados por el Departamento de Servicios Ambientales de la Municipalidad de San José, mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramos de contaminante por KRV. Los factores de emisión incluidos en el alcance de este estudio, fueron obtenidos a partir del *software* Mobile 6, que es un modelo computacional desarrollado por la US-EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados



Unidos) y modificado de acuerdo con las condiciones imperantes en Costa Rica. En el **Cuadro 4** se muestra la información requerida por el modelo Mobile 6 para el cálculo de los factores de emisión. Estos fueron estimados al tomar en consideración que los vehículos bajo condiciones de arranque y paro, a bajas velocidades tienen eficiencias bajas y aumentan sus emisiones.

**Cuadro 4.** Información requerida como datos de entrada para la operación del modelo Mobile 6

Parámetro	Datos de entrada proporcionados
Región	Ciudad a una altitud menor o igual a 5 500 ft (1 677 m)
Año calendario a evaluar	2015
Velocidad promedio de circulación en la región	13,1 km/h <sup>(1)</sup>
Temperatura máxima diaria para la región	25,8 °C <sup>(2)</sup>
Temperatura mínima diaria para la región	17,4 °C <sup>(2)</sup>
Contenido de azufre en diésel	50 ppm <sup>(3)</sup>

(1) Dato aportado por la Dirección de Planificación del Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

(2) Promedio de las estaciones del Instituto Meteorológico Nacional ubicadas en la zona

(3) Información proporcionada por la Refinadora Costarricense de Petróleo

### 2.3.2 Proceso de compostaje

Mediante esta técnica, la materia biodegradable se transforma en un producto útil que se puede utilizar como mejorador del suelo. Las emisiones que se generan en el proceso de compostaje de los residuos dependen de su composición química e incluyen mayoritariamente: dióxido de carbono, amoníaco y lixiviados (Jiménez, 2013). Para la construcción de este escenario se tomó en cuenta que un 55,3 % del total de los RSU generados diariamente en el cantón (239,4 ton) corresponden a una fracción orgánica, bajo una expectativa de que el 5 % del total producido sea sometido a compostaje. Como parte de este proceso se consideraron las siguientes etapas: selección y separación de materiales, trituración, homogenización, formación de pilas de composteo y ventilación. Además, se tomó en cuenta un tiempo de estabilización de los residuos de 56 días y que los lixiviados formados se utilizan para inocular los residuos que inician el proceso. El control de oxígeno se realizó mediante volteo mecánico y tuberías. En el **Cuadro 5**, se presentan los datos de entrada utilizados para la estimación de las emisiones.



**Cuadro 5.** Datos empleados en la determinación de las emisiones generadas en el proceso de compostaje de RSU

Emisiones		Fuente
	<b>CO<sub>2</sub>:</b> 250-390 kg de CO <sub>2</sub> /t residuos 22 kg de CO <sub>2</sub> /t residuos por uso de combustible fósil <b>Partículas PM total:</b> 0,06 kg /t residuos <b>NO<sub>x</sub>:</b> 0,29 kg /t residuos <b>Hidrocarburos HC:</b> 0,06 kg /t residuos <b>SO<sub>x</sub>:</b> 0,31 kg /t residuos <b>NH<sub>3</sub>:</b> 0,50 kg /t residuos <b>CH<sub>4</sub>:</b> 0,00014 kg /t residuos <b>HCl:</b> 0,0000003 kg /t residuos	Komilis y Ham, 2004
Lixiviados	450 L/t residuos	
Requerimiento promedio diario de combustible	2,60 L diésel/t residuos	
Requerimiento promedio de energía eléctrica	29 -167 kWh/t residuos	
Composta producto del proceso	25 % del peso de residuos ingresados	

### 2.3.3 Proceso de tratamiento mecánico-biológico

Implica la separación mecánica de los RSU en dos categorías: biodegradables, los cuales son sometidos a una descomposición de tipo aerobio o anaerobio y fracción de rechazo, que está compuesta por residuos reciclables y no fermentables, los cuales son transportados a plantas de reciclaje o incineración. Las etapas principales del proceso incluyen: recepción, separación manual por tamaño, separación por forma y densidad de metales, trituración y proceso biológico. En la digestión anaerobia de los residuos biodegradables, a diferencia del compostaje, la materia orgánica es degradada por efecto de la acción microbiana en ausencia de oxígeno y como resultado se genera biogás y un producto digerido (Smith *et al.*, 2001).

El biogás resultante tiene una composición estándar aproximada de 50 % a 70 % de metano (CH<sub>4</sub>), 30 % a 40 % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y menos del 5 % de hidrógeno (H<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y trazas de otros gases como el amoníaco y nitrógeno. El volumen de biogás generado es de 100 m<sup>3</sup>/ tonelada de residuos biodegradables y se considera tiene una capacidad para generar 600 kW de calor o 180 kW de electricidad a una eficiencia de 30 % por tonelada de residuos (Jiménez, 2013). Los lixiviados generados en el proceso de digestión anaerobia se aprovechan para inocular los residuos a tratar, posteriormente la mezcla es bombeada a los biodigestores donde permanecen de 2 a 3 semanas (Smith *et al.*, 2001). En el Cuadro 6, se presentan los datos de entrada utilizados para la estimación de las emisiones.

Para la construcción de este escenario se partió del hecho de que todos RSU generados serían tratados con esta técnica, donde el 55,3 % corresponde a materia orgánica, mientras que solo el 24,5 % tiene algún potencial de reciclaje y un 20,2 % cuenta con un escaso valor en el mercado.

**Cuadro 6.** Datos empleados en la determinación de las emisiones generadas en el proceso de tratamiento mecánico-biológico de RSU

Emisiones		Fuente
	<b>CO<sub>2</sub>:</b> 22 kg de CO <sub>2</sub> /t residuos	Komilis y Ham, 2004
	<b>CH<sub>4</sub>:</b> 0,073 t CO <sub>2</sub> e /t residuos	
	<b>N<sub>2</sub>O:</b> 0,003 t CO <sub>2</sub> e /t residuos	
	<b>Partículas PM total:</b> 0,038 kg /t residuos	
	<b>NO<sub>x</sub>:</b> 0,14 kg /t residuos	
	<b>Hidrocarburos HC:</b> 0,023 kg /t residuos	
	<b>SO<sub>x</sub>:</b> 0,19 kg /t residuos	
	<b>HCl:</b> 0,00000014 kg /t residuos	
Lixiviados	0 a 490 L/t residuos	
Requerimiento promedio diario de combustible	1,70 L diésel/t residuos	
Requerimiento promedio de energía eléctrica	16,95 kWh/t residuos	
Composta producto del proceso	0,47 t sustrato/t residuos	

### 2.3.4 Proceso de incineración

La incineración de residuos consiste en un proceso exotérmico de oxidación química a alta temperatura. La combustión se realiza en exceso de oxígeno y tiene como principal objetivo la generación de energía calorífica que puede ser utilizada para generar electricidad. Esta técnica se aplica a aquellos residuos que poseen un poder calorífico medio y alto, con un contenido de compuestos orgánicos mayor al 30 %, inorgánicos menor al 15 % (cenizas) y que no contengan más del 65 % de agua (Waldner, Halter, Sigg, Brosch, Gehrman, & Keunecke, 2013). Existen tres clases de tecnologías utilizadas en la incineración de RSU: combustión de masa, quema de desechos como combustible y las cámaras de combustión modulares, sin embargo, solo en la primera los residuos son tratados sin ningún tipo de procesamiento previo (Jiménez, 2013). En el Cuadro 7, se presentan los datos de entrada utilizados para la estimación de las emisiones, al partir de una temperatura de combustión de 1 200°C.



**Cuadro 7.** Datos empleados en la determinación de las emisiones generadas en el proceso de incineración de RSU

Emisiones		Fuente
	<b>CO<sub>2</sub>:</b> 0,985 t de CO <sub>2</sub> /t residuos	
	<b>Partículas PM 10:</b> 12,60 kg /t residuos	USEPA, 2011
	<b>Partículas PM 2,5:</b> 12,60 kg /t residuos	
	<b>NO<sub>x</sub>:</b> 1,83 kg /t residuos	
	<b>CO:</b> 0,32 kg /t residuos	
	<b>Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Niquel (Ni):</b> 0,00214 kg /t residuos	
	<b>Plomo (Pb):</b> 0,11 kg /t residuos	
Cenizas	249 kg/t residuos	Schuster, 1999
Energía útil presente en los RSU a incinerar sin separación previa	2,29 kcal/kg residuos	
Energía útil presente en los RSU a incinerar solo fracción de rechazo sin valor comercial	0,28 kcal/kg residuos	Poletto y Dasilva, 2009
Potencial de generación de energía eléctrica	116 kWh/t residuos	
Requerimiento promedio diario de energía o combustible	20 kg gas/ t residuos	Schuster, 1999

### 2.3.5 Disposición final en rellenos sanitarios

Las emisiones que se generan producto de esta técnica incluyen metano y otros compuestos orgánicos que son resultado de procesos biológicos y las reacciones químicas dentro del sitio. El biogás generado se puede aprovechar para producir electricidad a razón de 0,001 kW/t residuos confinados (Caplan, Grijalva, & Jakus, 2002). La combustión del metano generado (usualmente 60 % CH<sub>4</sub> y 40 % CO<sub>2</sub>) tiene potencial para originar 180 kW de electricidad/t residuos con una eficiencia de 30 % (Jiménez, 2013). Los lixiviados producto de la descomposición de la materia orgánica poseen una alta carga de bacterias, materia orgánica y generalmente, son aprovechados para acondicionar los residuos que iniciarán el proceso de digestión. Para la elaboración de este escenario se partió del hecho de que al menos un 3 % del total de los residuos recolectados es sometido a procesos de reciclaje. A continuación, se muestran las variables de entrada utilizadas en el análisis de las emisiones generadas (Cuadro 8).



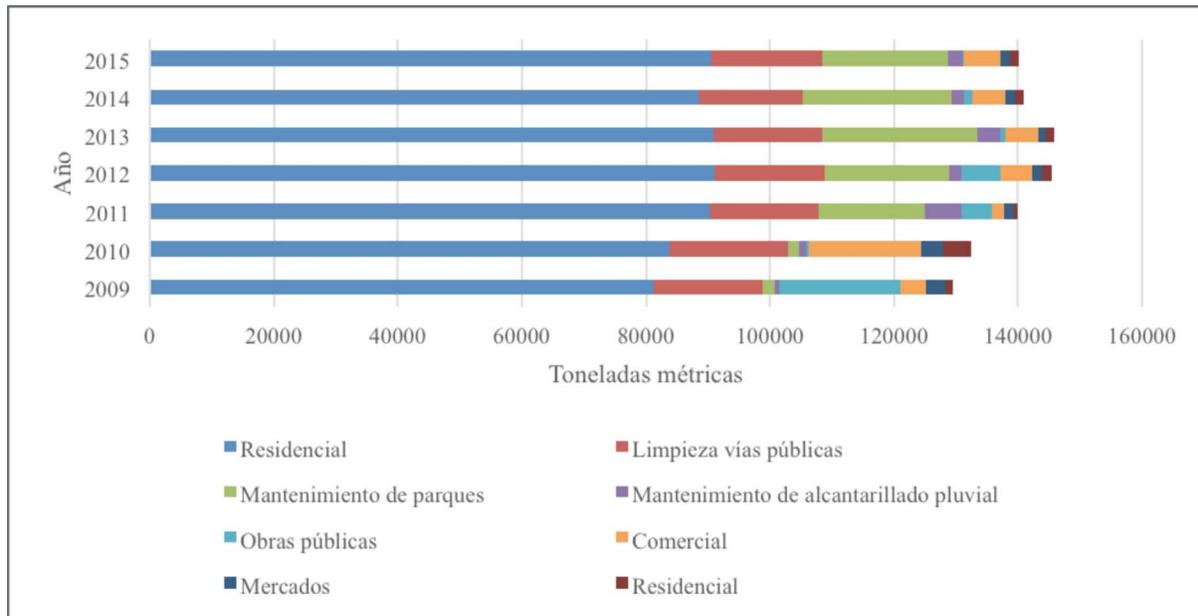
**Cuadro 8.** Datos empleados en la determinación de las emisiones generadas en la disposición final de RSU en un relleno sanitario

Emisiones		Fuente
	CO <sub>2</sub> : 45 % volumen	USEPA, 2011
	CH <sub>4</sub> : 50 % volumen	Komilis y Ham, 2004
	N <sub>2</sub> : 5 % volumen	Miranda y Halle, 1997
	Hidrocarburos HC: 0,02 kg /t residuos	Jiménez, 2013
	Partículas PM totales: 0,038 kg /t residuos	
	SO <sub>x</sub> : 0,19 kg /t residuos	
	NO <sub>x</sub> : 0,14 kg /t residuos	
	CO: 0,015 kg /t residuos	
	Benceno: 0,05 kg /t residuos	
	Cloroformo: 0,007 kg /t residuos	
	1,1,1-Tricloroetano: 0,013 kg /t residuos	
Requerimiento promedio de energía o combustible/día	0,4 L/d x t residuos	
Potencial de generación de energía eléctrica	/t residuos	

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Recolección

Durante el año 2015, se recolectaron diariamente 433 toneladas métricas de residuos sólidos, en el cantón de San José, de las cuales un 64,6 % provenían del sector residencial, seguido de la limpieza de vías y el comercio, con un 14,5 % y 12,8 % respectivamente (**Figura 1**). La participación del sector residencial se ha mantenido relativamente constante en los últimos cinco años representando cerca de 7 000 toneladas mensuales. La Municipalidad de San José cuenta con un total de 57 rutas de recolección diferentes con recorridos promedios comprendidos entre 32,4 y 42,5 km. Cada una de las rutas dura en promedio 5 horas con 27 minutos y se transporta una carga aproximada de 12,17 toneladas de residuos por camión recolector (MSJ, 2016).



**Figura 1.** Aporte de las diversas fuentes al proceso de recolección de residuos en el cantón de San José 2009-2015

Como producto del proceso de recolección de residuos se generan un total de 377,4 t CO<sub>2</sub>e/año, donde el CO<sub>2</sub> totaliza un 72 % de las emisiones de gases efecto invernadero. Por otra parte, esta actividad produce 5,26 t/año de CO (monóxido de carbono) y 0,66 t/año de NOx.

**Cuadro 9.** Estimación de las emisiones de GEI generadas en el proceso de recolección de residuos en el cantón de San José

Entradas	Valores promedio	Fuente	Emisiones t/d
Volumen de residuos	433 t/d		
Distancia de recolección	1 050 km/día		
Rendimiento promedio de combustible	1,91 km/l		
Factor de emisión CO <sub>2</sub>	0,71 kg CO <sub>2</sub> /km	Smith <i>et al.</i> , (2001)	0,746
Factor de emisión CH <sub>4</sub>	261 g CO <sub>2</sub> e/l	Vollebergh (1997)	0,144
Factor de emisión N <sub>2</sub> O	261 g CO <sub>2</sub> e/l		0,144
Factor de emisión Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	2,50 g/l	Vollebergh (1997)	0,0014
Factor de emisión de Hidrocarburos (HC)	3,14 g/km	Vollebergh (1997)	0,0033
Factor de emisión de monóxido de carbono (CO)	13,47 g/km		0,143
Factor de emisión de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0,71 kg/km	USEPA (2004), Mobile 6.2.	0,0019
Factor de emisión de óxidos de nitrógeno (NOx)	17,37 g/km		0,0057
Factor de emisión de PM <sub>2,5</sub>	0,03 g/km		0,00003



### 3.2 Comparación de las alternativas de tratamiento

**Cuadro 10.** Resultados obtenidos de la evaluación de los escenarios de tratamiento de RSU planteados

Descripción	Escenarios							
	Compostaje		Biológico-mecánico		Incineración		Relleno sanitario	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
<b>Materia prima</b>								
RSU t/d	11,97		408,4		408,4		408,4	
<b>Energía</b>								
Requerimiento diario de combustible	Diésel 31,12 L 1 165 MJ		Diésel 693,7 L 25 969 MJ		GLP 8,16 t/d 407 857 MJ		Diésel 163 L 6 110 MJ	
Requerimiento diario de energía/ kWh	1 999 7 196 MJ		6 916 24 899 MJ					
Energía útil (MJ)			0		822 899			
Energía útil fracción de rechazo (MJ)			0		94,8			
Energía útil en RSU, sin separación previa MJ					3 917			
Energía útil presente en los RSU a incinerar solo fracción de rechazo sin valor comercial MJ					95,31			
Potencial de generación de energía eléctrica (MWh)					47,33		73,45	
Generación de biogás, (m <sup>3</sup> /d)							81 666	
Energía contenida en el biogás generado /(GJ)							16,69	
<b>Emisiones (t/d)</b>								
CO <sub>2</sub> proceso	4,93		8,98		401,9		58,23	
CO <sub>2</sub> combustión								
CH <sub>4</sub> proceso (CO <sub>2</sub> e)	0,00004		345,9				474,29	
N <sub>2</sub>							0,020	
N <sub>2</sub> O (CO <sub>2</sub> e)			1,22					
Partículas PM total	0,00072		0,0155		5,14		0,016	
Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Níquel					0,00093			
Plomo (Pb)					0,044			
NOx	0,00347		0,0316		0,75		0,057	
CO					0,13		0,0029	
HC	0,00071		0,0094				0,010	
SOx	0,00371		0,0775				0,080	
NH <sub>3</sub>	0,00599							
Benceno							0,0092	
Cloroformo							0,0013	
1,1,1-Tricloroetano							0,0025	



Descripción	Escenarios							
	Compostaje		Biológico-mecánico		Incineración		Relleno sanitario	
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
<b>Subproductos</b>								
Composta (t/d)		2,99		106,1				
Lixiviados (L/d)		5 386						
Cenizas (t)						101,60		

Para cada uno de los escenarios planteados se realizó un análisis de flujo de entradas y salidas de materiales y energía, tal como se muestra en el **Cuadro 10**. De acuerdo con los resultados obtenidos la disposición final en rellenos sanitarios es el tratamiento que más emisiones de gases efecto invernadero origina con 532,5 t CO<sub>2</sub>e/d, seguido por la incineración de RSU con 401,9 t/d. Es importante mencionar que para ambos escenarios se asume que al menos un 3 % de los residuos se reciclan y un 5 % de estos se utilizan para compostaje, de forma tal que el flujo de entrada de materiales parte de 408,4 t de RSU/d. Al comparar las emisiones de GEI por las diferentes alternativas de tratamiento propuestas, con respecto al escenario actual de uso de rellenos sanitarios, se contabilizan reducciones que rondan entre un 24 % y 33 %. Si se analiza la contribución de las emisiones individuales de GEI de cada estrategia de gestión de residuos, se puede observar que la práctica actual de disposición final es la que genera las tasas de emisión de CH<sub>4</sub> más altas (474,9 t CO<sub>2</sub> eq./d) al representar un aporte de 88,2 % del total de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios, en comparación con la incineración de residuos, donde las emisiones predominantes corresponden al CO<sub>2</sub> resultante principalmente del sistema de descarga de la chimenea debido a la combustión de residuos. Adicionalmente, durante la incineración, los átomos de N contenidos en los NO<sub>x</sub> emitidos son precursores del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Liu et al., 2014).

Cuando se queman los RSU para obtener energía, el C presente en los residuos se libera como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), junto con una pequeña cantidad de otros GEI como N<sub>2</sub>O. Diversos estudios reportan que un incremento en la fracción biodegradable en los residuos a ser incinerados también puede conducir a un aumento en la emisión de N<sub>2</sub>O (Ryu, 2010). Cabe destacar que el proceso de incineración genera adicionalmente, importantes emisiones de contaminantes criterio del aire como partículas (5,14 t/d), NO<sub>x</sub> (0,75 t/d) y CO (0,13 t/d), cuyo impacto ambiental debe ser tomado en cuenta a la hora de realizar el análisis de factibilidad respectivo.

El contenido energético de los residuos ofrece una buena oportunidad para la generación de energía, siempre y cuando exista la máxima utilización de los materiales, respetando la jerarquía en el manejo de residuos. A partir del balance energético se procedió a realizar la estimación de la recuperación de energía potencial de la generación de residuos a través de la incineración (como un potencial teórico) o de la recuperación de gas de relleno sanitario en vertederos gestionados. A partir de la disposición de los residuos producidos en el cantón en rellenos sanitarios, se generan un total de 81 666 m<sup>3</sup>/d de biogás, el cual podría ser recuperado al desarrollar un potencial de generación de energía eléctrica de hasta 73,45 MWh. La instalación de sistemas eficientes de aprovechamiento del biogás podría significar una reducción de



emisiones de GEI cercana a 133,2 kg CO<sub>2</sub> por tonelada de residuos tratados. Por otra parte, mediante el proceso de incineración se obtiene un potencial de generación eléctrica cercano a 47,3 MWh, razón por la cual esta técnica de disposición de residuos podría ser una fuente de energía que sustituya a otras convencionales, si se gestiona adecuadamente. Los RSU con un contenido de humedad inferior al 50 % son adecuados para la incineración directa (Leckner, 2015). El papel y el plástico son más favorables para la incineración debido a su alto contenido energético, mientras que los metales y el vidrio no pueden ser considerados para la incineración por lo que deben reciclarse o reutilizarse para obtener ingresos.

#### 4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el desarrollo de acciones que fortalezcan la incineración y el tratamiento biomecánico de residuos como alternativas a la disposición final de residuos en los rellenos sanitarios en el cantón de San José, representa una oportunidad para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero de hasta un 24 % - 33 %. Adicionalmente, se hace de primera necesidad contemplar en las medidas de mitigación, el cobeneficio de la utilización de los residuos como una fuente renovable de energía, ya sea mediante la recuperación de biogás capturado en los rellenos sanitarios o a través de los procesos de incineración de los residuos.

Sin embargo, se hace necesario ampliar el alcance del presente estudio para incluir otros costos ambientales asociados a las diferentes técnicas de disposición final de residuos sólidos, tales como la generación de residuos remanentes en el proceso (cenizas), formación de lixiviados, emisiones de contaminantes criterio del aire entre otros. Además, no se debe olvidar la necesidad de incorporar las dimensiones económicas y sociales como parte de los criterios a valorar en la discusión de la orientación que tomará el modelo de gestión de residuos sólidos para el cantón.

#### 5. Agradecimientos

Los autores reconocen el valioso aporte realizado por la Municipalidad de San José, sin el cual no se podría haber desarrollado el presente estudio.

#### 6. Referencias

- Caplan, A. J., Grijalva, T. C. & Jakus, P. M. (2002). Waste not or want not? A contingent ranking analysis of curbside waste disposal options. *Ecological Economics*, 43 (2-3), 185-197. doi: [10.1016/S0921-8009\(02\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00210-0)
- Hinchliffe, D., Frommann, J. & Gunsilius, E. (2017). *Waste to energy options in municipal solid waste management*. Eschborn: GIZ.
- INEC [Instituto Nacional de Estadística y Censos] (2011) *Censo Nacional de Población 2011*. San José, Costa Rica: INEC.



- INM [Instituto Meteorológico Nacional] (2015). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono, 2012*. San José, Costa Rica: IMN.
- Jiménez, R. (2013). *Análisis de alternativas para el manejo de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de México*. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Jin J., Wang Z. & Ran S. (2006) Comparison of contingent valuation and choice experiment in solid waste management programs in Macao. *Ecological Economics*, 57 (3), 430-441. doi: [10.1016/j.ecolecon.2005.04.020](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.04.020)
- Kiss, G. y Encarnación G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, (79), 39-51. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907903>
- Kiss, G. y Mendoza F. (1998). *Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales*. México: Ingeniería y Ciencias Ambientales.
- Komilis, D. P. & Ham, R. K., (2004). Life-Cycle Inventory of Municipal Solid Waste and Yard Waste Windrow Composting in the United States. *Journal of Environmental Engineering*, 130 (11), 1390-1400. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:11\(1390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:11(1390))
- Liu, W., Tian, J. P. & Chen, L. J. (2014). Greenhouse gas emissions in China's ecoindustrial parks: a case study of the Beijing Economic Technological Development Area. *Journal of Cleaner Production*, 66, 384-391. doi: [10.1016/j.jclepro.2013.11.010](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.010)
- Menikpura, S., Sang-Arun, J. & Bengtsson, M. (2013). Integrated Solid Waste Management: an approach for enhancing climate co-benefits through resource recovery. *Journal of Clean Production*. 58, 34-42. doi: [10.1016/j.jclepro.2013.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.012)
- Miranda, M. & Hale B. (1997). Waste not, want not, the private and social cost of waste to energy production. *Energy Policy*, 25 (6), 587-600. doi: [10.1016/S0301-4215\(97\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00050-5)
- Municipalidad de San José (2016). *Indicadores de gestión de residuos sólidos urbanos 2011-2015*. Departamento de Servicios Ambientales, San José, Costa Rica.
- Nieto, J. (2014). *Evaluación económica-ecológica de las alternativas de manejo de los residuos sólidos urbanos para mitigar gases de efecto invernadero en la ciudad de México*. (Tesis doctoral), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Poletto, J. A. & Da Silva, C. L. (2009). Influence of the Separation of Municipal Solid Wastes to Recycling in the Incineration Process with Energy Generation. Universidad Estadual Paulista. *Información Tecnológica*, 20 (2), 105-112.
- Ryu, C. (2010). Potential of municipal solid waste for renewable energy production and reduction of greenhouse gas emissions in South Korea. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 60, 176-183.



- Schuster, H. (1999). Plantas incineradoras de residuos en Austria, Agencia Medioambiental de Austria.
- SEMARNAT [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales] (2006). Diagnóstico básico para la prevención y gestión integral de residuos. México. Disponible en [http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico\\_basico\\_extenso\\_2012.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf)
- SEMARNAT [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales]. (2009). *El medio ambiente en México en resumen 2009*. Gobierno Federal de México.
- Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K. & Bates, J. (2001). Waste Management Options and Climate Change: Final Report. European Commission, AEA Technology.
- Soto, S. (2013). *Informe final: décimo noveno informe del estado de la nación en desarrollo humano sostenible: a dos años de la Ley GIR*. (Informe Programa Estado de la Nación). San José, Costa Rica: CONARE.
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. (2011). *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Disponible en <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42>
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. (2004). *MOBILE6 Vehicle Emission Modeling Software*. Disponible en <http://www.epa.gov/otaq/m6.htm>
- Volleberg, H. (1997). Environmental externalities and social optimality in biomass markets: waste to energy in The Netherlands and biofuels in France. *Energy Policy*, 25 (6), 605-621. doi: [10.1016/S0301-4215\(97\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00052-9)
- Waldner, M. H., Halter, R., Sigg, A., Brosch, B., Gehrmann, H. J. & Keunecke, M. (2013). Energy from Waste – Clean, efficient, renewable: Transitions in combustion efficiency and NO<sub>x</sub> control. *Waste Management*, 33 (2), 317-326. doi: [10.1016/j.wasman.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.007)