

## EVALUACIÓN TÉCNICA Y ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN SOGAMOSO–BOYACÁ, COLOMBIA

### Technical and energy evaluation of municipal solid waste in Sogamoso–Boyacá-Colombia

Ariam Lozano Pérez<sup>1</sup>, Javier Chaparro Barajas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Colombia. <sup>2</sup>Instituto Ciencia de los Materiales de Sevilla (CSIC-US), España. Email: [javchabar@alum.us.es](mailto:javchabar@alum.us.es)

(Recibido 31 de Octubre de 2023 y aceptado 05 de Diciembre de 2023)

#### Resumen

Los residuos sólidos municipales (MSW) por sus siglas en inglés, son aquellos residuos generados por la población en las ciudades, producto de las actividades residenciales, institucionales y comerciales en cada municipio, los cuales se consideran basura y son llevados a un relleno sanitario para su disposición final. Su composición es diversa, residuos orgánicos, inorgánicos, microorganismos entre otros. Los residuos con composición inorgánica, en su mayoría cuentan con propiedades energéticas medidas a través de su capacidad calorífica, esta propiedad es de gran importancia para aprovecharla en procesos Waste to Energy (WTE). En Colombia aún no existe un caso exitoso de implementación de tecnologías de conversión energética de residuos y la viabilidad dependerá del contexto regional además de las particularidades del mercado. El presente trabajo muestra un caso de estudio específico por medio de una evaluación técnica del potencial aprovechamiento como fuente de energía de los MSW recibidos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir del municipio de Sogamoso. Los resultados mostraron que la recuperación de solo el 42.3% de estos residuos tiene un potencial energético aproximado de 628 TJ\*año<sup>-1</sup>, lo cual contribuye a la oferta en la demanda energética de las industrias de la región y la posible sustitución de combustibles fósiles como carbón, además del aporte positivo en la disminución del impacto ambiental y al aumento en 5 años de la vida útil del relleno sanitario ubicado en el municipio de Sogamoso.

**Palabras clave:** *energía, residuos sólidos municipales, Sogamoso, waste to energy.*

#### Abstract

Municipal solid waste (MSW) is the waste generated by the city population, a product of residential, institutional, and commercial activities in each municipality. It is considered garbage and is taken to a landfill for its final disposition. Its composition is diverse, organic and inorganic waste, microorganisms among others. Waste with inorganic composition mostly has energy properties measured through its heat capacity; this property is of great importance to be used in Waste to Energy (WTE) processes. In Colombia there is still no successful case of implementation of waste-to-energy conversion technologies and feasibility will depend on the regional context in addition to the particularities of the market. This work shows a specific case study through a technical evaluation of the potential use as an energy source of the MSW received in the Terrazas del Porvenir landfill in Sogamoso. The results showed that the recovery of only 42.3% of this waste has an approximate energy potential of 628 TJ\*year<sup>-1</sup>, which contributes to the supply of energy demand in the region's industries and the possible substitution of fossil fuels such as coal, in addition to the positive contribution to reducing the environmental impact and increasing the useful life of the landfill located in Sogamoso by 5 years.

**Key words:** *energy, municipal solid waste, Sogamoso, waste to energy.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La correcta gestión de los residuos sólidos municipales MSW por sus siglas en inglés (Municipal Solid Waste) cada día toma mayor importancia en municipios y ciudades, factores como el crecimiento demográfico, económico y la demanda de energía que son indicadores desarrollo económico y progreso social contribuyen a aumentar la generación de estos residuos, por lo tanto, garantizar un aprovechamiento de estos, dentro del marco de la economía circular es una prioridad actual para los gobernantes [1].

Una nueva fuente de energía denominada Waste to energy (WtE) que proviene de MSW ha sido utilizada alrededor del mundo en diferentes países para la generación de calor y electricidad, a partir del aprovechamiento térmico de los residuos dependiendo de factores como sus características fisicoquímicas, su capacidad calorífica y la cantidad disponible. En el caso de China Zhan y colaboradores describen todo un panorama de los beneficios económicos, sociales y ambientales de poner en práctica este tipo de iniciativas de nuevas fuentes generación de energía [2].

Por otra parte, un estudio realizado en Grecia ha descrito como la inversión de diferentes tecnologías WtE podrían ayudar al crecimiento económico generado por la creación de empleo, la preservación de extensiones de tierra y claramente las reducciones de impactos ambientales negativos [3]. Ahora bien, dentro de las tecnologías WtE se destaca la conversión a energía eléctrica que se puede generar mediante procesos de incineración [4], digestión anaerobia [5], gasificación [6], aunque cada proceso está ligado a la ejecución de tecnologías ya existentes [7, 8].

En el contexto nacional, Colombia cuenta con una generación aproximada de 11 millones de toneladas de residuos sólidos que son dispuestos en rellenos sanitarios al año, la generación promedio de residuos por persona diaria se estima en 0,76 Kg [9], de los cuales entre un 35% a 45% corresponde a plástico, papel, madera y empaques, materiales que tienen propiedades fisicoquímicas

aprovechables y en presencia de oxígeno pueden generar energía en forma de calor. En la zona central del país, que corresponde al altiplano Cundiboyacense, se localiza el municipio de Sogamoso que se encuentra rodeado de una zona de alta actividad industrial, su influencia con industrias como la siderúrgica, cementera, generación de energía eléctrica, agrícola y minera, hacen que sea un municipio con alta demanda energética y dependiente del mercado de materias primas para obtener dicha energía.

El municipio de Sogamoso cuenta con una población en la cabecera municipal de 111.799 habitantes según el último censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [10] y se espera un crecimiento para los próximos 15 años de 13,70% de su población, esto indica que en el año 2035 podría tener una población de 127.115 habitantes aproximadamente, principalmente en la cabecera municipal el cual corresponde al 90% de la población. Teniendo en cuenta esta proyección es posible concluir que el aumento de residuos sólidos tendrá un aumento en similar proporción.

Los residuos sólidos municipales (MSW), han sido estudiados como fuentes de energía [7]. La figura 1, describe algunos procesos con los cuales se puede obtener diferentes tipos de energía. Cabe resaltar que estos procesos también requieren etapas de segregación, clasificado y preprocesamiento de los MSW como materia prima para su conversión en energía; cada de una de estas etapas debe evaluarse y definirse de acuerdo con la caracterización de los residuos que va a depender de su origen, características fisicoquímicas, características de aprovechamiento y proceso de transformación energética.

La generación de residuos en los centros urbanos está correlacionada a variables como aumento de la población, aumento de la producción industrial, aumento del consumo de bienes y servicio; es por lo que, dentro del enfoque de desarrollo sostenible, el correcto manejo y administración de los MSW es un nuevo paradigma para las administraciones [11]. Analizar la sinergia entre la recolección y adecuada disposición de los MSW,

como la adopción de tecnologías WtE representa un proceso de ganancia, contribuyendo al problema de disposición adecuada de los residuos municipales y aumentando la disponibilidad de energía, lo cual toma relevancia mayoritaria en los lugares con dificultad al acceso de energía. Actualmente las tecnologías WtE han sido desarrolladas y pueden ser adaptadas dependiendo de factores económicos y ambientales [12]. El material combustible producido mediante la transformación de los residuos sólidos municipales por pretratamientos es referido en la literatura como RDF de las siglas en inglés de Refuse-Derive Fuel [13].

El presente trabajo muestra el caso de estudio específico del aprovechamiento energético de MSW dispuestos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir del municipio de Sogamoso mediante tecnologías Waste to Energy en donde se realizó la evaluación técnica y energética de 1 proceso RDF como equivalente térmico del carbón y tres (3) tecnologías de conversión a energía eléctrica: incineración, gasificación y digestión anaeróbica. Este análisis se realizó teniendo en cuenta las variables específicas de cantidades y sus equivalentes energéticos por medio de la relación del poder calorífico propio de cada tipo de residuo aprovechable.

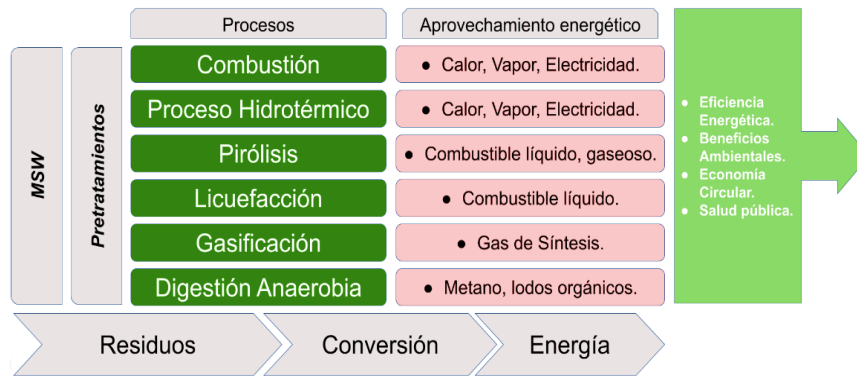


Figura 1. Opciones tecnológicas WtE [8].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Contexto regional y geográfico

El municipio de Sogamoso se ubica en la provincia de Sugamuxi en el departamento de Boyacá, con una extensión geográfica de 208 km<sup>2</sup> y una población aproximada de 111.799 habitantes [10]. Limita con los municipios de Nobsa, Tópaga, Mongua, Monguío, Aquitania, Cuitiva, Iza, Firavitoba, Tibasosa y es el segundo municipio del departamento con más habitantes luego Tunja capital del departamento. Este municipio está ubicado en una zona industrial del departamento, con presencia de empresas siderúrgicas como Acerías Paz del Río y Sidenal; empresas cementeras como Cemento Argos, Cementos Holcim, Cementos del Oriente, Cementos Nacional; empresas generadoras de energía eléctrica por medio de procesos térmicos como Sochagota y Gensa, además

de empresas alfareras de producción de materiales de construcción, cada una de estas industrias utilizan carbón como materia prima.

En el departamento de Boyacá se estima una generación diaria de MSW de 480 t\*día<sup>-1</sup> [14] para lo cual existen dos (2) rellenos sanitarios principales, el relleno sanitario Pírgua ubicado en Tunja y el relleno sanitario Terrazas del Porvenir ubicado en Sogamoso. Para el objeto del presente trabajo se tomará en consideración el volumen de residuos que son ingresados al relleno sanitario Terrazas del Porvenir por estar ubicado en el municipio de Sogamoso.

El relleno sanitario terrazas del porvenir está ubicado en una zona rural al nororiente del municipio de Sogamoso. Es el segundo de mayor capacidad y se estima que

en la actualidad atiende el 36% de los residuos del departamento de Boyacá, atendiendo a 44 municipios de los 123 municipios del departamento, lo que representa una población alrededor de 2 veces la población de Sogamoso y una disposición de 50000 a 60000 ton\*año<sup>-1</sup>. Los volúmenes de recepción durante el periodo de 2016 al 2020 se muestran en la figura 2, la línea indica el volumen total de MSW y las barras corresponden al volumen correspondiente únicamente al municipio de Sogamoso, se observa que para el 2018 el relleno gestionó únicamente residuos del municipio de Sogamoso como consecuencias de la pérdida de capacidad. A partir del año

2019 luego de un aumento de la capacidad por ampliación se retoma la recepción de otros municipios. Sin tener en cuenta el 2018, el promedio de recepción de MSW entre los años 2016 a 2020 fue de 57343 ton\*año<sup>-1</sup>. En el plan de manejo integral de residuos sólidos del municipio de Sogamoso [15] se realiza la caracterización por fracciones de los residuos recibidos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir. La figura 3, describe la tipología de residuos, la fracción con mayor cantidad es la orgánica con un 33.4% y los residuos con potencial de generación de energía son: plásticos, textiles, papel, cartón y madera que son los considerados para este estudio.

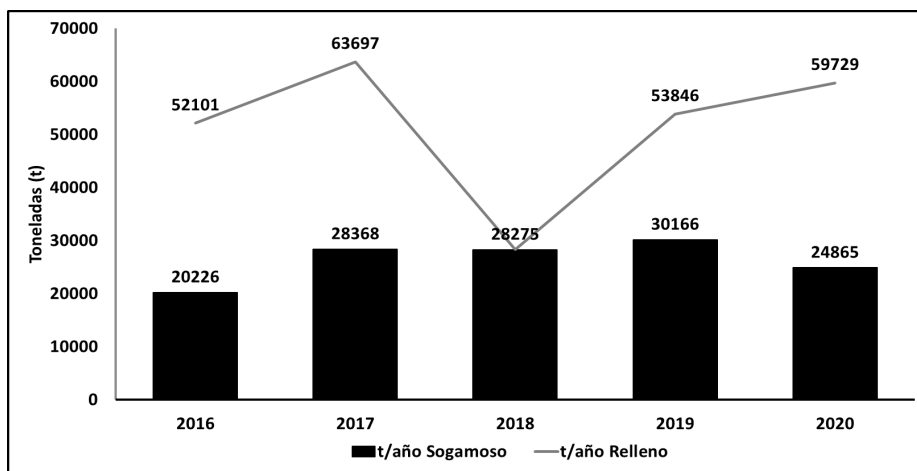


Figura 2. Volúmenes de residuos gestionados en el relleno terrazas del porvenir [14].

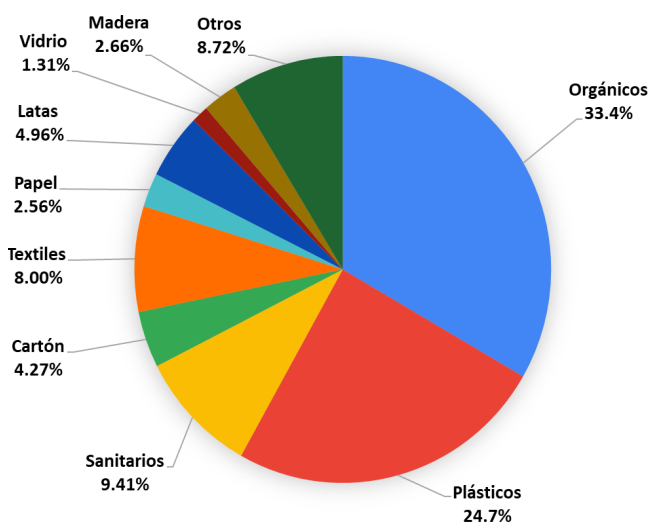


Figura 3. Caracterización promedio residuos sólidos municipales Sogamoso [14].

## 2.2 Potencial de conversión de MSW a energía térmica

El proceso de conversión térmica de los residuos parte de la preparación de un combustible derivado de residuos mediante la segregación, separación, trituración, secado de los residuos sólidos municipales, la fracción aprovechable tiene propiedades térmicas que dependerá de la humedad, composición de los distintos materiales y estado físico [16]. Es posible realizar una comparación del estimado de energía a través del potencial térmico y su equivalente en combustible fósil en este caso carbón con el modelo mostrado en las ecuaciones (1) y (2).

$$TP = LCV_{MSW} * M_{MSW} \quad (1)$$

$$Carbon_{equiv} = \frac{LCV_{MSW}}{LCV_{coal}} * M_{MSW} \quad (2)$$

La ecuación (1) muestra el potencial térmico TP por sus siglas en inglés (Thermal potencial), el cual es posible calcular por producto del poder calorífico más bajo LCVMSW por sus siglas en inglés (Low Calorific Value) el cual corresponde al poder calorífico más bajo luego de descontar la energía de vaporización del agua como humedad y producida durante el proceso de combustión y la masa total de residuos MMSW el resultado de esta operación da el valor de energía en unidades de calor GJ. Para este estudio, se realizó un estimado diario. La ecuación (2) muestra el equivalente de esa energía en unidades másicas de carbón para obtener un estimado de las toneladas de carbón, mediante la relación de los LCV de los residuos (tabla 1) y el carbón (28.3MJ\*Kg<sup>-1</sup>), y la masa total de MSW aprovechables.

**Tabla 1.** Modelos matemáticos de potencial conversión energía eléctrica proveniente de MSW.

Proceso	Modelo matemático
Incineración	$ERP_1 = 0.28 * \eta * M * LCV_{msv} \quad (3)$
Gasificación	$ERP_G = 0.28 * G * Rf * \eta * LCV_{msv} \quad (4)$
Digestión Anaeróbica	$ERP_{DA} = P * R_{AC} * f * M_{OFMSW} * Q * \eta \quad (5)$

## 2.3 Potencial de conversión de MSW a energía eléctrica

Uno de los usos más importantes de los combustibles es su conversión en energía eléctrica, que puede estimarse

mediante modelos matemáticos reportados en literatura [17]. En la tabla 1, se muestran tres de estos modelos para el cálculo del potencial de energía eléctrica para cada uno de los procesos planteados.

En las ecuaciones (3) (4) y (5), EPR (Electrical Power Recovery) es el potencial de energía recuperada (MWh\*día<sup>-1</sup>), M es la masa total de residuos sólidos (t\*día<sup>-1</sup>) y LCVMSW representa el valor de capacidad calorífica más baja de la fracción aprovechable (MJ\*kg<sup>-1</sup>), además la eficiencia del proceso de incineración  $\eta$  es 18% [17]. Para el proceso de gasificación, G es el número de toneladas procesadas por día (t\*día<sup>-1</sup>) y Rf es el porcentaje de rechazo después del tratamiento mecánico y la eficiencia del proceso de gasificación  $\eta$  es 23% [18].

Para el caso de la digestión anaerobia, P hace referencia al número de habitante, RAC es la producción anual de MSW per cápita (t\*hab-dia<sup>-1</sup>), f es la fracción orgánica de los MSW, MOFSW la producción de metano generado por la fracción orgánica (67.5 Nm<sup>3</sup>\*t<sup>-1</sup>) y Q es el LCV del biogás debido al metano (37.2MJ\*Nm); y  $\eta$  en este caso es 26% [19]. Finalmente, cabe destacar que los valores obtenidos son una estimación del potencial de generación de energía que dependerá de cada contexto y de cada uno de los pretratamientos asociados a cada uno de ellos.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Valores de capacidad calorífica de la fracción de residuos térmicamente aprovechable

Se realizó un estimado de la capacidad calorífica de los residuos térmicamente aprovechables gestionados en el relleno sanitario terrazas del porvenir. La tabla 2 refiere la composición normalizada de la fracción energéticamente aprovechable que se puede obtener de los MSW descritos en la figura 3, junto con sus valores calóricos correspondientes [20]. El LCV ponderado de los residuos aprovechables es de 25.9 MJ\*kg<sup>-1</sup>, que equivale al 42.3% del total de MSW promedio recibidos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir.

### 3.2 Potencial de conversión a energía eléctrica

Un estimado del potencial de generación de energía eléctrica en base a un promedio diario de 157 toneladas de MSW o equivalentes a 66.4 toneladas de MSW aprovechables energéticamente caracterizados y presentados en la figura 3 se describen a continuación en la tabla 3.

**Tabla 2.** Composición ponderada de MSW aprovechables y sus correspondientes LCV.

Tipo de MSW	Ponderado	LCV <sub>MSW</sub> (MJ*kg <sup>-1</sup> )
Plásticos	58.0%	32.4
Cartón	10.0%	15.6
Textiles	19.0%	18.4
Papel	6.00%	15.6
Madera	7.00%	15.4
Total	100%	25.9

**Tabla 3.** Equivalente en energía eléctrica de 3 procesos de conversión.

Proceso	MWh*día <sup>-1</sup>
Incineración	86.1
Gasificación	79.6
Digestión Anaeróbica	9.59

La tecnología de mayor potencial de generación de energía eléctrica es la incineración ya que incluye el 100% de los MSW aprovechables en comparación con la gasificación donde influye el factor de rechazo teórico después de un procesamiento mecánico y solo el 72.5% de los MSW aprovechables se tienen en cuenta para el proceso [18] sin embargo la diferencia entre los dos procesos es solo de 6.5 MWh\*día<sup>-1</sup>. Por otra parte, un proceso de digestión anaerobia tiene poco potencial de generación de energía eléctrica ya que en comparación con el proceso de incineración la cantidad de energía decae alrededor de una décima parte de este, esto es de esperar ya que la fracción orgánica que es la única utilizada en este proceso y solo corresponde a un 33% del total de MSW.

Analizando el contexto energético de la región, se considera que existe una limitante de mercado debido a la competencia de generación eléctrica de procesos térmicos tradicionales muy cercanos, los cuales tienen

un costo de generación bajos. La demanda energética diaria del departamento de Boyacá se estima en 4.79 GWh\*día<sup>-1</sup> de acuerdo con la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) [21], con lo que el potencial en el proceso de incineración representaría tan solo el 1.8% y debido a los mayores costos de producción no generaría una viabilidad en el corto plazo.

### 3.3 Estimación energía recuperada vs combustible fósil

Utilizando la ecuación (1) y (2) se obtuvo un estimado del potencial de energía térmica y su equivalente en carbón térmico de la fracción energéticamente aprovechable de los MSW. Los valores descritos en la tabla 4 muestran el equivalente térmico diario de 1721 GJ\*día<sup>-1</sup> que equivale a 60.8 t\*día<sup>-1</sup> de carbón que se podría sustituir, esto quiere decir que si se hace un estimado económico tomando como base un precio de la tonelada de carbón promedio de 165000 COP [21] se tendría un valor de mercado potencial de alrededor de 10 millones COP diarios, que sin duda para cualquier industria sería un beneficio, si pudiera reducir sus costos de producción al sustituir el carbón por el uso de RDF.

**Tabla 4.** Equivalencia térmica en energía y volumen de combustible.

Proceso	Equivalente térmico	Equivalente carbón
Producción combustible derivado de residuos	1721 GJ*día <sup>-1</sup>	60.8 t*día <sup>-1</sup>

Sin embargo, la transformación de los residuos a energía en forma de calor dependerá de la preparación del RDF que deberá cumplir los requerimientos técnicos de un producto competitivo al combustible fósil normalmente utilizado en la región (carbón, gas natural, gasolina o petróleo), además de cumplir con características específicas para cada proceso industrial donde se utilice.

Lo anteriormente descrito, supone un desafío en la viabilidad económica del uso de RDF, pero a su vez establece una oportunidad para que nuevas empresas realicen y tecnifiquen el sistema de producción y distribución de RDF a partir de los MSW aprovechables dispuestos en el relleno sanitario Terrazas del porvenir. Además, la región cuenta ya con

un mercado potencial, que corresponde a algunas de las empresas cementeras que disponen de un sistema de co-procesamiento de residuos y permite el uso del RDF que claramente proporciona beneficios económicos y ambientales por la sustitución térmica del carbón, dadas las 4 empresas cementeras que funcionan cerca al municipio de Sogamoso, existe un buen potencial de demanda de RDF en el sector.

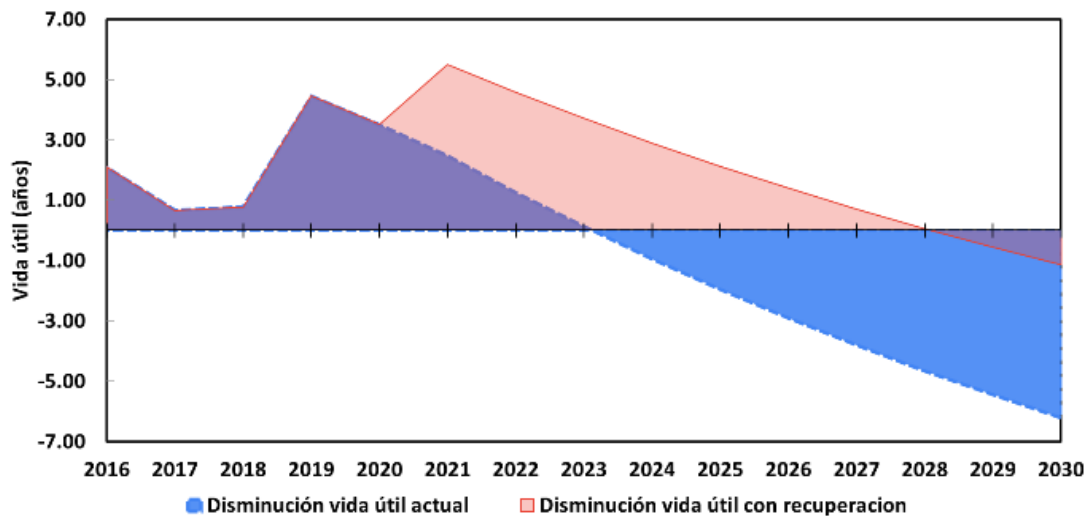
Cabe destacar que la implementación de tecnologías waste to energy promueve la utilización de fuentes de energía no convencionales, reduciendo en gran medida los impactos ambientales negativos, así, estos procesos están directamente relacionados con los objetivos de desarrollo sostenible, economía circular y política verde que en el país brinda beneficios tributarios por medio de la ley 1715 de 2014 [22], lo cual genera un mayor beneficio económico a las empresas que promuevan este tipo de procesos.

permisos. Representando menores gastos operativos por la no realización de obras civiles, modificación de suelos o inversiones en capacidad sin aprovechamiento de los residuos sólidos municipales.

### 3.4 Cambio en la vida útil del relleno sanitario

Uno de los beneficios de mayor relevancia en la recuperación de residuos sólidos es el aumento de la vida útil del relleno sanitario Terrazas del Porvenir, para el año 2020 contaba con un volumen de capacidad remanente de 223600 m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta un índice de compactación de 0,94 t\*m<sup>-3</sup>, tendría una capacidad másica de 210184 toneladas. Con un aumento del 6% en los siguientes años y a la vez proyectar un descenso de la vida útil en los siguientes años, la figura 4 muestra esa proyección, la línea punteada indica una disminución en la que se estima una vida útil de 3.52 años.

**Figura 4.** Proyección vida útil del relleno actual y con recuperación de residuos.



El cambio en la vida útil luego de la implementación de un proceso WastetoEnergy que reduce la cantidad de residuos dispuestos en el relleno en un 42.3% correspondiente a la fracción aprovechable energéticamente, podemos observar en la figura 4 un aumento de la vida útil de 5 años. Estas proyecciones son de gran interés ya que indican un aumento de capacidad sin realizar procesos de ampliación de terrazas, adquisición de predios,

## 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo mostró la viabilidad técnica de un proyecto de recuperación energética para la implementación de tecnologías WtE en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir del municipio de Sogamoso. El potencial de energía eléctrica no es relevante por el mercado energético de la región, sin embargo, el potencial de energía térmica



equivalente al carbón podría tener una gran demanda de en industrias que manejen este material como generador de energía en sus procesos, casos como las 4 cementarías distribuidas alrededor del municipio de Sogamoso.

La cantidad de residuos que tienen potencial energético de por medio de la generación de RDF en el relleno sanitario del municipio de Sogamoso es del orden de aproximadamente 20000 toneladas que equivale aproximadamente a 628 TJ\* $\text{año}^{-1}$  y puede aumentar hasta 42000 toneladas anuales si se tiene en cuenta la fracción orgánica. El uso de esta fracción aprovechable de MSW representa, el aumento de la vida útil del relleno sanitario y la generación de posibles empresas que traten y distribuyan estos residuos en forma de RDF.

Los beneficios ambientales y tributarios al aprovechar los MSW representan un atractivo económico tanto para el relleno sanitario Terrazas del porvenir como para las industrias presentes alrededor del municipio de Sogamoso que utilicen nuevas fuentes energéticas como RDF. Así los resultados descritos en este estudio son la base para continuar con las evaluaciones económicas y ambientales correspondientes a la implementación de escenarios con uno o varios procesos WtE.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa Maestría en Administración de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia- UPTC, facultad seccional Sogamoso.

### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses o relaciones personales que podrían haber parecido influir el trabajo reportado en este manuscrito.

### REFERENCIAS

- [1] M. M. Siddiqi et al., "Evaluation of Municipal Solid Wastes Based Energy Potential in Urban Pakistan," *Processes*, vol. 7, no. 11, p. 848, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7110848>
- [2] D. Zhang, G. Huang, Y. Xu, and Q. Gong, "Waste-to-energy in China: Key challenges and opportunities," *Energies*, vol. 8, no. 12, 2015. <https://doi.org/10.3390/en81212422>
- [3] C. S. Psomopoulos and N. J. Themelis, "A guidebook for sustainable waste management in Latin America," in *Proceedings of the International Resource Recovery Congress Waste-to-Energy*, Vienna, Austria, 2014, pp. 8–9.
- [4] C. Ofori-Boateng, K. T. Lee, and M. Mensah, "The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option," *Fuel Processing Technology*, vol. 110, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.11.008>
- [5] R. Kothari et al., "Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>
- [6] F. C. Luz et al., "Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>
- [7] S. Nanda and F. Berruti, "A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 403, p. 123970, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970>
- [8] C. Cui et al., "Overview of public-private partnerships in the waste-to-energy incineration industry in China: Status, opportunities, and challenges," *Energy Strategy Reviews*, vol. 32, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100584>
- [9] S. Kaza et al., "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050," *World Bank Publications*, 2018.
- [10] DANE, "Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo DANE,".
- [11] A. P. Rodrigues et al., "Developing criteria for performance assessment in municipal solid waste management," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 748–757, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.067>



- [12] S. T. Tan et al., “Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia,” *Energy Conversion and Management*, vol. 102, pp. 111–120, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- [13] E. C. Rada and G. Andreottola, “RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU,” *Waste Management*, vol. 32, no. 6, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.017>
- [14] C. O. L. Superservicios, “Disposición final de residuos sólidos Informe Nacional 2018,” A. C. M. Ruiz, A. F. L. Sánchez, and C. A. B. Garzón, Eds., Superservicios, 2019.
- [15] S. de D. y. A. Municipio de Sogamoso, “Plan integral de manejo de residuos sólidos en el municipio de Sogamoso (PGIRS),” Sogamoso, 2015.
- [16] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), “Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries,” 2017.
- [17] S. Alzate, B. Restrepo-Cuestas, and Á. Jaramillo-Duque, “Municipal Solid Waste as a Source of Electric Power Generation in Colombia: A Techno-Economic Evaluation under Different Scenarios,” *Resources*, vol. 8, no. 1, p. 51, 2019. <https://doi.org/10.3390/resources8010051>
- [18] J. M. Fernández-González et al., “Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities,” *Waste Management*, vol. 67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003>
- [19] A. Gómez et al., “Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.027>
- [20] C. S. Psomopoulos, I. Venetis, and N. J. Themelis, “The impact from the implementation of ‘Waste to Energy’ to the economy. A macroeconomic approach for the trade balance of Greece,” *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 23, no. 11, 2014.
- [21] Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME, “Resolución No. 000235 de 2020.”
- [22] Congreso de Colombia, “Ley 1715 de 2014, Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional,” 13 de mayo de 2014, D.O 49150.