



# Valorización económica y energética de los residuos sólidos del municipio de El Bagre (Antioquia)

*Recycling and Energetic Valorization of Solid Waste of the Municipality of El Bagre (Antioquia)*

Andrés Felipe Montoya Rendón<sup>1</sup>, Sergio Valencia<sup>2</sup>,  
Wilman Alberto Villadiego Castillo<sup>3</sup>, Alejandra Díaz Gómez<sup>4</sup>

Recibido: 1 marzo de 2020 Aprobado: 29 abril de 2020

**Resumen.** En Colombia, la gestión de los residuos sólidos se basa en los planes de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS). En el departamento de Antioquia, la Gobernación de Antioquia, por medio de la Ordenanza N.º 10 de 2016 “Basura Cero”, compromete a sus municipios a disponer en rellenos sanitarios como máximo el 20 % de los residuos generados. Sin embargo, en el municipio de El Bagre (Antioquia), la falta de gestión en la implementación de su PGIRS convirtió su relleno sanitario en un botadero a cielo abierto y llevó a su cierre. Esto llevó a realizar la disposición en el relleno sanitario del municipio de Cauca, lo que ha generado sobrecostos. Por lo tanto, se propone crear conciencia en el municipio de El Bagre sobre la separación en la fuente, la valoración económica y la valorización energética con fines

de cogeneración de energía térmica. Para la valoración del potencial energético se determinó el poder calorífico inferior (PCI) de los residuos sólidos residenciales urbanos. Estos residuos sólidos presentaron un PCI de 2.697,23 kcal/kg, que pueden generar 1.012 MWh, lo que llevaría a una reducción en los costos de disposición final y al cumplimiento de la Ordenanza N.º 10 de 2016.

**Palabras clave:** Residuos sólidos, caracterización, valorización energética, valoración económica, economía circular.

**Abstract.** In Colombia, the solid waste management is based on the integral solid waste management program (PGIRS). Moreover, the Government of Antioquia, through the ordinance

1 Autor correspondiente: Magíster en Gestión y auditorías ambientales. Tecnológico de Antioquia. Colombia, Medellín. amontoya2@tdea.edu.co. ORCID: 0000-0001-7070-1716

2 Doctor en ingeniería. Tecnológico de Antioquia. Colombia, Medellín. sergio.valencia@tdea.edu.co. ORCID: 0000-0002-1165-1795

3 Ingeniero ambiental. Tecnológico de Antioquia. Colombia, Medellín. wilvilla32@hotmail.com. ORCID: 0000-0001-5910-4128

4 Ingeniero ambiental. Tecnológico de Antioquia. Colombia, Medellín. alejandra\_0615@hotmail.com. ORCID: 0000-0002-9185-0726

number 10 of 2016 "Zero Waste", commits its municipalities to dispose in landfill a maximum of 20% of the waste generated. However, in the municipality of El Bagre (Antioquia), the lack of management in the implementation of its PGIRS turned its landfill into dumpsite, and it led to its closure. This forced to make the final disposal in the landfill of the municipality of Caucasia. It has generated cost overruns. Therefore, it is proposed to raise awareness in the municipality of El Bagre about the separation at the source, the economic valuation, and energy recovery for the purpose of thermal power generation. For the assessment of the energy potential for cogeneration purposes, the lower calorific value (LCV) of urban residential waste was determined. These solid wastes have a LCV of 2 697.23 kcal / kg, which can generate 1.012 MW. This would lead to a reduction in costs in the final disposal programs, and compliance with the ordinance number 10 of 2016.

**Keywords:** solid waste, characterization, energy valuation.

## Introducción

La gestión integral de los residuos sólidos constituye una gran problemática a nivel mundial. Factores como la concentración de población en las zonas urbanas, el desarrollo del sector industrial, los cambios en patrones de consumo, el mejoramiento de la calidad de vida, el crecimiento económico, entre otros, llevan al aumento de la generación de residuos sólidos municipales [1].

Según un informe del Banco Mundial [2], en el 2050 a nivel mundial se van a generar 2,01 miles de millones de toneladas de residuos sólidos municipales. Además, se espera que en ese año la producción de residuos sólidos aumente a 3,4 miles de millones de ton. Por otro lado, según el mismo informe, la producción per-cápita (PCC) mundial será de 0,74 kg/hab-día, con variaciones entre 0,11 y 4,54 kg/hab-día [2].

El manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales ha generado diversas consecuencias como la contaminación de los recursos naturales, el aumento de poblaciones de vectores y una

alta generación de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático, entre otros problemas [2], [3]. Se estima que 1.600 millones de ton de CO<sub>2</sub> equivalentes de gases de efecto invernadero fueron generadas en la gestión de residuos sólidos en el año 2016, lo que equivale a alrededor del 5 % del total mundial de emisiones. Por lo tanto, una forma de contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es por medio de una mejor gestión de los residuos sólidos [2].

En el año 2000, la Unión Europea introdujo el concepto de *Economía Circular*, con el fin de tener un crecimiento sostenible. El objetivo principal de la Economía Circular es reintroducir al sistema económico materiales que se encuentran en los residuos sólidos no peligrosos, con el fin de utilizarlos nuevamente en procesos productivos [4], [5], [6].

En Colombia, la gestión integral de los residuos sólidos no peligrosos se basa en la relación generador-empresa de servicio público de aseo, la cual se encuentra reglamentada en la Ley 142 de 11 de julio de 1991 (Congreso de Colombia, 1991) y por el Decreto 2981 de 20 de diciembre de 2013 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2013), inmerso en el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.

El artículo 2 del Decreto 2981 de 2013 establece por medio de la figura del plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) un conjunto ordenado de objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos definidos para el manejo de los residuos sólidos. A su vez, la Resolución 754 de 2014 obliga a todos los municipios del país a formular e implementar el PGIRS municipal, además, evaluarlo y hacerle seguimiento y control. El PGIRS municipal debe ser actualizado cada período constitucional de la administración municipal, para propiciar el mejoramiento continuo del manejo de los residuos sólidos y de la prestación del servicio de aseo a nivel municipal o regional.

Por otro lado, Colombia participó en la cumbre de las Naciones Unidas de 2015, en la cual se

aprobaron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y en ellos se hace énfasis en la gestión de residuos sólidos como necesidad para cumplir con las metas mundiales. Esto llevó a Colombia a pasar de un modelo de economía lineal hacia uno de economía circular. Es así como se crea la política nacional para la gestión de residuos sólidos, por medio del Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes), del Departamento Nacional de Planeación. El documento Conpes 3874 de 2016 presenta cuatro ejes estratégicos: prevenir la generación de residuos, minimizar los que son llevados a disposición final, promover la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de los residuos y evitar la generación de gases de efecto invernadero.

En el departamento de Antioquia (Colombia), la Asamblea Departamental (2016) creó la Ordenanza 10 de 2016: "Basura Cero", como instrumento para el manejo integral de los residuos sólidos en los municipios de Antioquia, que obliga a sus 125 municipios a llevar a disposición final un máximo del 20 % de los residuos generados. Para esto se plantean diversas estrategias, a saber: la reducción en el consumo y en la generación, la reutilización de los desechos, y la educación y la promoción de la cultura de manejo de residuos sólidos desde la fuente para usuarios domiciliarios, instituciones y sectores productivos. Por lo tanto, los municipios de Antioquia están obligados a establecer programas para incentivar la separación desde la fuente, la valoración y el aprovechamiento de los residuos.

Existen varias alternativas de valorización de los residuos como el reciclaje, el compostaje y la biodigestión. Además, los residuos sólidos pueden ser aprovechados para generación de energía a través de procesos bioquímicos (digestión aeróbica y anaeróbica) y procesos termoquímicos (incineración, gasificación y pirólisis) [7]. Entre estos procesos, los termoquímicos son la mejor alternativa porque tienen un mayor potencial energético y mayor capacidad de reducción del volumen de residuos sólidos, con un 90 % en volumen y un 75 % en peso [7].

Para determinar si un residuo sólido presenta características para su aprovechamiento por medio

de la incineración, se calcula el volumen de residuos a incinerar, el poder calorífico inferior de los residuos (PCI), costos de inversión y gastos de explotación, de acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [8].

El Municipio de El Bagre (Antioquia) dispuso que sus residuos sólidos fueran a un relleno sanitario ubicado en el sector La Sardina (vereda El Puente). Sin embargo, la mala gestión de este relleno lo convirtió en un botadero a cielo abierto, a pesar de contar con un PGIRS actualizado y con la licencia ambiental aprobada por la autoridad ambiental, en este caso la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), oficina territorial Panzenú.

Según el PGIRS 2015-2027 [9], en el botadero se encontraron residuos ordinarios, orgánicos y peligrosos, que estaban compuestos principalmente de restos de alimentos y material reciclable no aprovechado como papel, cartón, vidrio, plástico y metales. Además, residuos especiales, hospitalarios y el afloramiento de lixiviados a campo abierto.

En consecuencia, la oficina territorial Panzenú de Corantioquia, por medio de la Resolución 130P2-1204-2077 de 2012, inició el procedimiento sancionatorio que declaró infractor al Municipio de El Bagre, y le impuso sanción económica por la afectación a los recursos agua, suelo, aire y paisaje, al omitir el cumplimiento de las obligaciones impuestas en la Resolución 130PZ-643 de 2003, bajo el cual se otorgó la licencia ambiental. Además, en esta resolución se estableció que el Municipio de El Bagre debía adelantar las acciones correctivas para la mitigación de los impactos ambientales en el sitio de la disposición final, y presentar un plan de cierre y abandono del relleno sanitario técnicamente clausurado, según Resolución 130PZ-1532 de 2008 y el Acto Administrativo 160PZ-1603-3596 de 2016, que declara la pérdida de vigencia de la licencia ambiental, y ordenó la suspensión de toda actividad de disposición de cualquier tipo de residuos e iniciar con lo estipulado en el plan de cierre y abandono.

Esto obligó a la empresa prestadora del servicio de aseo de El Bagre (Aguas de El Bagre S.A. E.S.P.) a realizar la disposición final de sus residuos sólidos en el Relleno Sanitario Campo Alegre de Caucasia, el cual es operado por Eco Ambiental Activa de Colombia S.A. E.S.P., a 83 km de distancia del casco urbano de El Bagre. Por lo tanto, se generaron sobrecostos de operación en los programas de recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos generados por el Municipio de El Bagre.

Con base en lo anterior, este trabajo tiene como objetivo concientizar sobre la separación en la fuente, la valoración económica y el aprovechamiento de los residuos sólidos con fines de generación de energía térmica, para una buena gestión integral de residuos sólidos del Municipio de El Bagre, que lleven al mejoramiento en los componentes de generación, presentación y aprovechamiento. Para esto, se realizó una caracterización y una valorización económica y energética de los residuos sólidos residenciales urbanos y se comparó con los costos de disposición final sin recuperación y con recuperación.

## Marco teórico

### Toma de muestra y caracterización

El foco para la toma de muestra y la caracterización fueron 10 suscriptores al azar de los estratos 1 y 2, de los barrios La Vega, Floresta, Porvenir y Portugal del municipio de El Bagre, mediante las metodologías establecidas por [10], [11]. En cada una de las viviendas se recolectaron los residuos sólidos y por medio de la **Ecuación 1** (Ec. 1) se determinó el peso total de la muestra. Además, con la **Ec. 2** se calculó el porcentaje de cada residuo generado en la muestra según ordinarios, orgánicos y reciclables. Con estos datos se estableció la PPC residencial de los barrios seleccionados por medio de la **Ec. 3**:

$$W_t = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

$$\% W_i = \frac{W_i}{W_t} * 100\% \quad (2)$$

$$PPC = \frac{W_t}{N_{hab} * N_{días}} \quad (3)$$

Donde:  $W_t$ = peso total de la muestra;  $W_i$ = peso de cada muestra de residuo (orgánico, textil, vidrio, metal y cada clase de residuo que se encuentre en la muestra);  $\% W_i$ = porcentaje muestra de residuo; PPC= producción per-cápita;  $N_{hab}$ = número de habitantes a los que se les efectuó la caracterización, y  $N_{días}$ = número de días de almacenamiento de los residuos sólidos.

### Valoración económica de los residuos sólidos residenciales urbanos

La valoración económica de los residuos se basó en el precio de comercialización de los residuos generados recuperables sin transformación establecida para el año 2019, por parte de la Asociación de Recicladores de Antioquia (Arreciclar).

### Valoración energética de los residuos sólidos residenciales urbanos

Se hizo la valoración energética de los residuos sólidos residenciales urbanos para su uso en medios térmicos de cogeneración. Se determinó el poder calorífico del residuo (PC) para un sistema de incineración, que se define como las calorías aportadas por unidad de peso o volumen del residuo.

El Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, Título F, establece que, con el PC, para el contenido de carbono, porcentaje de humedad y el contenido de metales, es posible implementar alternativas de gestión hacia la valorización energética de los residuos, los cuales pueden ser: biomasa estabilizada, fracciones de plásticos, celulosa (papel, cartón y madera), lodos biológicos estabilizados, así como textiles, caucho (que incluye llantas) y cuero.

El poder calorífico superior del residuo (PCS), que aprovecha la energía de condensación del agua, se calculó con las **Ecs. 4 y 5**.

$$PCS_{bs} = \frac{(MO + Madera + papel + textiles + ordinarios)\% * 4000}{100} + \frac{(plastico + caucho + cuero)\% * 9000}{100} \quad (4)$$

Donde: PCS<sub>bs</sub>= poder calorífico superior en base seca y MO = porcentaje de materia orgánica.

$$PCS_{bh} = \frac{(MO + madera + paper + textiles + ordinarios - 11.27)\% * 4000}{100} + \frac{plástico + caucho + cuero)\% * 9000}{100} \quad (5)$$

Donde: PCS<sub>bh</sub>= poder calorífico superior en base húmeda, MO = porcentaje de materia orgánica.

El poder calorífico inferior (PCI) es el calor de la combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua, se calculó con la **Ec. 6**.

$$PCI = PCS_{bh} - 6 * H \quad (6)$$

Donde: H = porcentaje de humedad promedio = 66,08 %.

### Cantidad de energía producida por residuos sólidos residenciales urbanos generados

La cantidad de energía en kilowatts (kWh) producidos por los residuos sólidos residenciales urbanos totales generados en el municipio de El Bagre se efectuó bajo la simulación de una central térmica constituida por una caldera, una turbina y un generador. Para esto se utilizó la **Ec. 7**, con el porcentaje de eficiencia del sistema térmico, según lo establecido por [12].

$$Erec = \frac{M * PCI * nt}{860} \quad (7)$$

En donde: Erec = energía recuperada; M = flujo de residuos (kg/hora); PCI = poder calorífico inferior; nt = eficiencia total de la planta, y 860 = factor de conversión kcal/kw - hora

### Análisis de costos de recolección, transporte y disposición

El análisis de los costos operativos de recolección, transporte y disposición se efectuó con base en información secundaria suministrada por Aguas de El Bagre, que es la empresa encargada de recolección y transporte de los residuos sólidos

del municipio de El Bagre. Además, se realizó el cálculo estimado de la cantidad de combustible que consumen los vehículos recolectores para transportar los residuos sólidos hasta el sitio de disposición final, en el Relleno Sanitario Campo Alegre del municipio de Caucasia.

## Resultados y Discusión

### Toma de muestra y caracterización

El municipio de El Bagre (Antioquia) se encuentra ubicado en la subregión del Bajo Cauca antioqueño. Posee una extensión de 1.563 km<sup>2</sup>, con una altitud de la cabecera municipal a 50 metros sobre el nivel del mar, y una temperatura promedio de 37° C. Tiene un área urbana de 12 km<sup>2</sup>, con una población urbana total de 25.691 habitantes para el año 2010, de los cuales el 63,46 % pertenecen al estrato uno [9].

Para la caracterización de los residuos sólidos residenciales urbanos generados en el municipio de El Bagre, se tomó una muestra representativa durante un día de almacenamiento de 10 viviendas de los barrios: La Vega, Floresta, Porvenir y Portugal. Se pesaron los residuos generados en cada vivienda, y por medio de la **Ec. 1** se determinó el peso total de la muestra, que fue de 18,16 kg. Además, con la **Ec. 2** se determinó el porcentaje de cada residuo sólido residencial urbano generado en la muestra según fueran ordinarios, orgánicos y reciclables (Tabla 1). La caracterización de los residuos sólidos mostró la siguiente composición: 61,7 % residuos orgánicos fermentables, 18,9 % residuos reciclables y 19,5 % residuos ordinarios o comunes.

La PPC residencial de los residuos sólidos se determinó con el peso total de la muestra, el tiempo de almacenamiento de los residuos sólidos y la población que lo generó (**Ec. 3**). Se encontró que la PPC residencial para los barrios La Vega, Floresta, Porvenir y Portugal del municipio de El Bagre fue de 0,47 kg/hab-día (Tabla 1).

Este valor concuerda con el PGIRS 2015-2017 de El Bagre [9], donde la PPC municipal es de 0,56 kg/hab-día. Además, guarda relación con las PPC residenciales de 0,513, 0,586 y 0,594 kg/hab-día, para los estratos 1, 2 y 3, respectivamente, del municipio. Por otro lado, este valor se ajusta al promedio encontrado para el municipio de

Medellín, con una PPC de 0,57 kg/hab-día, y a la PPC para el sector residencial del área metropolitana del valle de Aburrá, con 0,45 kg/hab-día, según lo establecido en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá 2006-2020 (PGIRS-R) [13], y a la PPC de la Comuna 2 del municipio de Bello (Antioquia) que es de 0,49 kg/hab-día [14].

La PPC residencial para el municipio de El Bagre está por debajo de la media nacional, con una PPC de Colombia de 0,84 kg/hab-día, según el Boletín n.º 6 de la Red Colombiana de Ciudades Cómo Vamos [15].

**Tabla 1.** Caracterización de los residuos y la producción per-cápita residencial (PPC) de los barrios La Vega, Floresta, Porvenir y Portugal del municipio de El Bagre.

Suscriptor	Residuos orgánicos (%)	Residuos reciclables (%)	Residuos ordinarios (%)	PPC (kg/hab-día)
1	71	4	25	0,34
2	80	7	13	0,40
3	70	19	11	0,43
4	79	5	16	0,44
5	54	19	27	0,33
6	54	19	27	0,60
7	78	10	12	0,63
8	12	83	5	0,38
9	34	19	47	0,68
10	84	4	12	0,51
<b>Promedio</b>	<b>62</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>0,47</b>

Fuente: Elaboración propia (2020)

Según las cifras proyectadas por el PGIRS 2015-2017 [9], en el año 2019, para una población estimada al finalizar el periodo de estudio de 49.407 hab., con una PPC en promedio de 0,56 kg/hab-día, se generaron aproximadamente 9.960 ton/año de residuos sólidos en la zona urbana, las cuales, en un alto porcentaje, fueron transportadas

para su disposición final hacia el Parque Ambiental Campoalegre (municipio de Cauca).

Según el PGIRS 2015-2017 [9], la caracterización de estos residuos mostró la siguiente distribución: 49,18 % orgánicos, 20,67 % inorgánicos, 8,91 % sanitarios, 20,61 barrido y poda y 0,63 % especiales



y peligrosos. La Tabla 2 muestra la composición del material reciclable residencial generado en el municipio de El Bagre que puede ser recuperable por medios físicos o químicos.

De la cantidad total de residuos generados en la zona urbana, 2.019,8 ton/año fueron material reciclable. Si se aprovechara económicamente esta cantidad de residuos reciclables y se realizara un aprovechamiento de la fracción orgánica en compostaje o biodigestión, llevaría a una reducción del 69,85 % de la cantidad de disposición final, que estaría apuntando a los objetivos de la Ordenanza n.º 10 de 2016 "Basura Cero" en el departamento de Antioquia.

**Tabla 2.** Composición del material reciclable residencial urbano en el municipio de El Bagre (año 2019).

Residuo	Cantidad (ton/año)	Fracción (%)
Papel y cartón	338,5	16,76
Otros residuos	463,7	22,96
Metales	103,8	5,14
Plástico	918,8	45,49
Vidrio	194,9	9,65
<b>Total</b>	<b>2.019,8</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia (2020) con datos del PGIRS 2015-2017 [9].

### Valorización económica de los residuos sólidos reciclables residenciales urbanos

Se tomó la cantidad total en kg/día de cada clasificación de residuos sólidos residenciales urbanos de la Tabla 2 y se multiplicó por el porcentaje de composición de cada clasificación de residuo, según el PGIRS 2015-2017 del Municipio de El Bagre [9]. Estas cantidades de cada composición se valorizaron económicamente con los precios de comercialización de los residuos generados recuperables sin transformación para el año 2019, en el municipio de Medellín, de acuerdo con Arrecicar (Tabla 3). Se puede determinar que el municipio de El Bagre, por depositar en el relleno sanitario de Cauca material reciclable, dejó de percibir durante el año 2019 un total de \$715.817.209/año aproximadamente. Este valor económico de los residuos se puede aumentar si se realiza una transformación física o química de los materiales.

**Tabla 3.** Valoración económica de los residuos reciclables residenciales urbanos para el año 2019.

Residuo	Precio* (\$/kg)	Cantidad (kg/día)	Valor total (\$/día)	Valor total (\$/ año)
Papel y cartón				
Periódico	500	21,3	10.665	3.892.761
Archivo	710	238,8	169.552	61.886.445
Cartón	320	361,6	115.710	42.234.092
Plegable	180	305,6	55.004	20.076.494
Total	-	<b>927,4</b>	<b>350.931</b>	<b>128.089.794</b>
Otros residuos				
	300	1.270,4	381.120	139.108.800
Metales				
Ferroso	820	70,7	57.952	21.152.548
No ferroso	580	171,2	99.285	36.238.882
Aluminio	800	42,6	34.060	12.431.806
Total	-	<b>284,4</b>	<b>191.297</b>	<b>69.823.237</b>
Plástico				
PET	900	309,4	278.439	101.630.072
PEAD	300	266,8	80.050	29.218.301
PVC	0	14,6	0	0
PEBD	300	1.324,4	397.305	145.016.493
PP	750	273,6	205.223	74.906.352
PS	0	202,1	0	0
Otros	0	126,4	0	0
Total		<b>2.517,3</b>	<b>961.017</b>	<b>350.771.218</b>
Vidrio				
Botella	175	438,7	76.779	28.024.160
Plano	0	95,3	0	0
Total		<b>534</b>	<b>76.779</b>	<b>28.024.160</b>
Total material recuperable		<b>5.533,5</b>	<b>1.961.143</b>	<b>715.817.209</b>

\* Precio de comercialización ARRECICLAR

Fuente: Elaboración propia (2020) con datos del PGIRS 2015-2017 [9].



### Valoración energética de los residuos sólidos

La Tabla 4 muestra la valoración energética de los residuos sólidos residenciales urbanos generados (**Ecs. 5, 6 y 7**). El valor  $PCI_{bh}$  de los residuos del sector residencial del municipio de El Bagre fue de 2.697,23 kcal/kg. Por lo tanto, es viable técnicamente la puesta en práctica de un tratamiento térmico de los residuos sólidos del municipio de El Bagre, según la metodología

del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Esta metodología establece que el  $PCI_{bh}$  mínimo para adoptar un sistema de incineración es por encima de 1.000 kcal/kg. Por otro lado, si en el municipio de El Bagre se efectuara una separación en la fuente de la materia orgánica, esta se podría aprovechar por medio de la metanización con biodigestores, para obtener una mayor eficiencia energética y calorífica.

**Tabla 4.** Valoración energética de los residuos sólidos residenciales urbanos del municipio de El Bagre.

Residuo	Promedio* (Ton/mes)	Fracción* (%)	Energía (kcal/kg)
Materia orgánica, residuos de alimentos	165,54	40,88	2.200
Residuos de jardín	69,37	17,13	-
Madera	0,91	0,22	-
Papel	3,26	0,81	4.000
Cartón	8,38	2,07	4.000
PET (1)	3,89	0,96	9.000
PEAD (2)	3,35	0,83	9.000
PVC (3)	0,18	0,04	9.000
PEBD (4)	16,65	4,11	9.000
PP (5)	3,44	0,85	9.000
PS (6)	2,54	0,63	9.000
Otros plásticos (7)	1,59	0,39	9.000
Vidrio	6,71	1,66	9
Metales	3,57	0,88	-
Tetrapack	0,31	0,08	-
Textiles	10,19	2,52	4.000
Ordinarios e inertes	29,98	7,40	-
Plástico aluminizado	3,57	0,88	9.000
Barrido	69,38	17,13	-
Peligrosos	2,12	0,52	-
<b>Total</b>	<b>404,93</b>	<b>100,00</b>	

Residuo	Promedio* (Ton/mes)	Fracción* (%)	Energía (kcal/kg)
PCSbs (kcal/kg) (Ec. 4)		3.544,51	
PCS <sub>bh</sub> (kcal/kg) (Ec. 5)		3.093,71	
PCI <sub>bh</sub> (kcal/kg) (Ec. 6)		2.697,23	

\* Datos tomados de [9].

Fuente: Elaboración propia (2020)

### Energía producida por los residuos sólidos generados del municipio de El Bagre

Bajo una simulación de un sistema de cogeneración constituido por una caldera, una turbina y un generador, al utilizar la **Ec. 7**, con un flujo de residuos (M) de 1.152 kg/h [9], un PCI<sub>bh</sub> de 2.697,23 kcal/kg, y al tener en cuenta que estos sistemas alcanzan en promedio un porcentaje de eficiencia total (nt) del 28 % [11], se obtiene una generación total de 1.012 MWh. El precio promedio de comercialización por kilovatio-hora (kWh) fue de \$287 kWh para 2019, lo que equivale a \$2.544.289.440/año.

Con esta energía el Municipio de El Bagre podría abastecer energéticamente a una población de 10.000 hab. Además, daría cumplimiento a la Ordenanza n.º 10 de 2016, "Basura Cero" en el departamento de Antioquia, que busca que se disponga en rellenos sanitarios como máximo el 20 % de los residuos generados. Por otro lado, la valoración energética pondría al Municipio de El Bagre en la economía circular, ya que esta permite completar el círculo de recuperación de los residuos y su transformación en recursos. Según la legislación de la Unión Europea, la producción de energía de las plantas de residuos a energía es aproximadamente un 50 % renovable y es una forma eficaz para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, los sistemas de cogeneración dan cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible proclamados por la ONU.

La generación total de 1.012 MWh de este sistema de cogeneración para el municipio de El Bagre es comparable con las de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), que son plantas de generación

de energía que aprovechan la energía cinética del agua y tienen una capacidad menor a 20 MW.

En Antioquia, las PCH forman parte de los proyectos de la Empresa de Generación y Promoción de Energía de Antioquia S.A. E.S.P. (GEN+ S.A. E.S.P.) y del Instituto para el Desarrollo de Antioquia (IDEA), los cuales promueven proyectos de generación de energía sostenible para mejorar las condiciones económicas de los municipios de Antioquia. Un sistema de cogeneración por medio de residuos sólidos, al igual que las PCH, por su tamaño e inversión, permitirían la participación de los municipios como socios, y además percibirían ingresos adicionales a los de las transferencias de ley.

### Análisis de costos de recolección, transporte y disposición

Los programas que presta la empresa encargada de la prestación del servicio de aseo en el municipio de El Bagre (Aguas de El Bagre S.A. E.S.P) son: recolección, transporte y disposición final. Además, barrido y limpieza de vías públicas, corte de césped y poda de árboles en vías y áreas públicas. El servicio de recolección es tres veces por semana, con dos carros compactadores con capacidad de 7 ton., de propiedad de Aguas de El Bagre.

Cada carro compactador es equipado con un conductor y dos operarios. El consumo de combustible día varía de 60 a 70 galones de ACPM. Además, están los costos de mantenimiento de los vehículos. La Tabla 5 muestra el costo de recolección, transporte, disposición final de residuos y manejo del relleno sanitario de El Bagre antes de su cierre, por un valor \$18.511.200/mes, lo que equivale a \$222.134.400/año.

**Tabla 5.** Costo de recolección, transporte, disposición final de residuos y manejo del relleno sanitario de El Bagre antes del cierre.

Costos de operación	Descripción	Cantidad	Costo día (\$)	Costo mensual (\$)
Operarios en el relleno	Fijo	1	47.178	1.415.340
Maquinaria	Veces al mes	1		1.200.000
Combustible	Galones ACPM/día	20	190.000	4.560.000
Mantenimiento carros	Repuestos			1.500.000
Operarios de recolección	Fijos	4	188.712	5.661.360
Conductores	Fijos	2	139.150	4.174.500
<b>Total</b>				<b>\$18.511.200</b>

Fuente: Elaboración propia (2020) con datos de Aguas de El Bagre S.A. E.S.P.

Después del cierre del relleno sanitario del municipio de El Bagre, los residuos generados se envían al relleno sanitario del municipio de Caucaasia. La Tabla 6 muestra las cantidades mensuales de residuos sólidos entregados al relleno sanitario del municipio de Caucaasia, durante el periodo del 1.º de enero a 31 de agosto de 2019, con un total de 3.405,16 ton., para un promedio de 425,64 ton/mes. Eco Ambiental Activa de Colombia S.A. E.S.P, que es la encargada del relleno, tiene una tarifa en pesos de \$54.103/ton dispuesta en el relleno, lo que lleva a un costo de \$276.340.811/año.

**Tabla 6.** Toneladas de residuos entregadas al relleno sanitario de Caucaasia.

Año 2019	Cantidad (Ton.)	Promedio (Ton/mes)
Enero	391,48	425,64
Febrero	341,01	
Marzo	406,26	
Abril	397,6	
Mayo	484,78	
Junio	492,95	
Julio	455,01	

Año 2019	Cantidad (Ton.)	Promedio (Ton/mes)
Agosto	436,07	
Total	3.405,16	

Fuente: Elaboración propia con datos de Aguas de El Bagre S.A. E.S.P.

Los costos de recolección y transporte mensual de los residuos generados en el municipio de El Bagre hacia el relleno sanitario del municipio de Caucaasia (después del cierre del relleno sanitario de El Bagre) se muestran en la Tabla 7, con un valor promedio de \$50.268.860/mes, durante el año 2019, lo que equivale a \$.603.226.320/año. Para esto se utilizan los carros de la Aguas de El Bagre S.A. E.S.P y se utiliza un tercer carro compactador con capacidad de 7 a 9 ton, que forma parte de un convenio con el operador del Relleno Sanitario de Caucaasia (Ecoambiental Activa de Colombia S. A. E.S.P). El carro compactador propiedad de Ecoambiental Activa de Colombia S. A. tiene un costo por viajes de \$750.000 y capacidad de carga de 7 ton., y el de 9 ton., de \$1 000 000 (según Aguas de El Bagre S.A. E.S.P. para el año 2019).

En total, la prestación del servicio de recolección y transporte de los residuos sólidos generados en

el casco urbano del municipio de El Bagre y su disposición final en el relleno sanitario del municipio de Caucaasia le costó a la empresa Aguas de El Bagre, en el año 2019, un total de \$73.297.261/mes, lo que equivale a \$879.567.131/año. Al

comparar este costo con el costo antes del cierre del relleno, con un valor de \$222.134.400/año, se observa un aumento del costo en \$657.432.731/año (295,96 %).

**Tabla 7.** Costo aproximado de recolección y transporte de los residuos sólidos urbanos del municipio de El Bagre hacia el relleno sanitario del municipio de Caucaasia.

Ítem	Descripción	Costo (\$/día)	Cantidad	Costo (\$/mes)
Salario operarios	Integral	47.178	4	5.661.360
Salario conductores	Integral	69.575	2	4.174.500
Combustible (ACPM )	Galones	712.500	2	17.100.000
Mantenimiento carros	General			3.333.000
Carro contratado	Viaje	750.000	16	12.000.000
Carro contratado	Viaje	1.000.000	8	8.000.000
<b>Costo Total</b>	<b>\$50.268.860</b>			

Fuente: Elaboración propia con datos del 2019 de Aguas de El Bagre.

## Conclusiones

El costo de disposición de los residuos sólidos del municipio de El Bagre en el relleno sanitario de Caucaasia llevó a un sobrecosto de 295,96 %, desde la clausura del botadero a cielo abierto en el cual se disponían, que pasó de \$222.134.400/año a \$879.567.131/año, para el año 2019. Los residuos sólidos del municipio de El Bagre están compuestos por residuos orgánicos fermentables (61,7 %), residuos reciclables (18,9 %) y residuos ordinarios

o comunes (19,5 %). La valoración económica de estos residuos da un valor de \$715.817.209/año. Además, estos residuos sólidos tienen un PCI de 2.697,23 kcal/kg, que puede generar 1.012 MW, a un valor de \$2.544.289.440/año. Por lo tanto, una valoración económica y energética de los residuos sólidos del municipio de El Bagre llevaría al cumplimiento de la Ordenanza n.º 10 de 2016 "Basura Cero" en el departamento de Antioquia, de la Gobernación de Antioquia.

## Referencias

- [1] H. Khandelwal, H. Dhar, A. Thalla, & S. Kumar, "Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review", *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 630-654, feb. 2019.
- [2] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, & F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Urban development Series. Washington, DC: World Bank Group, 2018.
- [3] A. F. Montoya Rendón, "Caracterización de Residuos Sólidos", *Cuaderno Activa*, vol. 4, núm. 2, pp. 67-72, dic. 2012.
- [4] Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes), Departamento Nacional de Planeación. *Documento Conpes 3874, Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Bogotá, D.C., 21-nov. 2016.
- [5] P. Morsetto, "Targets for a circular economy", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 153, pp. 104553, 2020.
- [6] M. T-Seng, A. Chiu, G. Liu, & T. Jantaralolica, "Circular economy enables sustainable consumption and production in multi-level supply chain system", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 154, pp. 104601, 2020.
- [7] N. Moltiel-Bohórquez y J. Pérez, "Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. Estrategias termodinámicas para optimizar el desempeño de centrales térmicas", *Inf. Tecnol.*, vol. 30, núm. 1, pp. 273-284, feb. 2019.
- [8] E. Rondón Toro, M. Szantó Narea, J. F. Pacheco, E. Contreras y A. Gálvez, *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL): Santiago de Chile, julio 2016.
- [9] Municipio de El Bagre. "Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2015-2017", Alcaldía de El Bagre, 2015.
- [10] S. Rawat & A. Daverey, "Characterization of household solid waste and current status of municipal waste management in Rishikesh, Uttarakhand", *Environ. Eng. Res.*, vol. 23, núm. 3, pp. 323-329, marzo 2018.
- [11] U. Aoike, "Household waste and local solid waste collection in Niamey, Republic of Niger", *African Study Monographs*, Suppl. 58, pp. 93-114, september 2019.
- [12] A. Morales, "Producción de energía por combustión de basuras en Bogotá", *Ingeniería e Investigación*, núm. 10, pp. 63-66, 1984.
- [13] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia, "Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá". Convenio N.º 325 de 2004, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad de Antioquia, marzo 2006.
- [14] A. F. Montoya Rendón, S. Valencia, M. Sánchez, y J. Vélez, "Valoración de los residuos sólidos de la Comuna dos de Bello (Antioquia), como sistema alternativo de aprovechamiento", *Cuaderno Activa*, vol. 10, núm. 1, pp. 67-76, feb. 2018.
- [15] Red Colombiana de Ciudades Cómo Vamos, *Comparación de la percepción ciudadana en 9 ciudades de Colombia, 2011*, Red Colombiana de ciudades Cómo Vamos. Bogotá: Grafismo Impresores, 2012.