

# Potencial de Energía Calorífica de los Residuos Sólidos Municipales para Reemplazar el Carbón Mineral

## Potential of Municipal Solid Waste Calorific Energy as Coal Replacement

Frank C. Vargas<sup>1</sup>, Yuleimy Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Profesor asistente, Departamento de Ingenierías, Programa de Ingeniería Agrícola, Fundación Universitaria de San Gil, Km vía 2, San Gil, Colombia.  
fvargas@unisangil.edu.co

<sup>2</sup> Joven investigadora de Indentus, Departamento de Ingenierías, Programa de Ingeniería Ambiental, Fundación Universitaria de San Gil, Km vía 2, San Gil, Colombia.  
yramirez@unisangil.edu.co

Recibido: 20Ago2014 – Revisado: 15Sep2014

Aceptado: 14Oct2014 – Publicado: 10Dic2014

**Resumen:** El aprovechamiento material y energético del residuo sólido municipal para la fabricación industrial de combustible derivado de residuos (*RDF*, por su sigla en inglés), constituye, por una parte, una oportunidad para la gestión ambiental empresarial; por otra parte, sirve para apoyar en las regiones la gestión integral de residuos sólidos en el sector público. Este estudio analiza el potencial calorífico del residuo sólido municipal (*RSM*) de la provincia de Guantán, como base para la producción de *RDF* en reemplazo del carbón mineral en la industria cementera para la producción de clínker. Se concluye que con el uso de *RDF*, como combustible renovable sustituto, se evita el 5,72% de emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*), se generan 12.300 Ton/año de carbono neutral y se evitan 1.128 Ton/año de *GEI* al reemplazar, con el potencial de *RSU*, el 5,4% del carbón mineral requerido.

**Palabras claves:** Residuo sólido municipal, combustible derivado de residuos, gases de efecto invernadero, reducción de emisiones, gestión ambiental empresarial.

**Abstract:** The material and energy use of the municipal solid waste (*MSW*) for the industrial production of refuse-derived fuel (*RDF*) constitute, on the one hand, an opportunity for environmental management; on the other hand, it gives the necessary regional support on solid waste management in the public sector. This study analyzes the potential of solid waste calorific energy in the province of Guantán, as a starting point for the production of *RDF* as a replacement of coal in the cement industry for the manufacturing of clinker. It is concluded that the use of *RDF*, as a substitute of renewable fuel, cuts the atmospheric emissions of greenhouse gases (*GHG*) in 5.72%. Moreover, 12,300 Ton/yr. of neutral carbon are generated and 1,128 Ton/yr. of *GHG* less are emitted as a result of reducing the required coal in 5.4%.

**Key words:** Municipal solid waste, refuse-derived fuel, greenhouse gases, emission reduction, environmental management.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las experiencias realizadas por plantas cementeras en el mundo con el uso de *RDF* podrían ser desarrolladas y aplicadas con éxito en una planta cementera localizada en el municipio de San Gil-Santander. El propósito es hacer tratamiento ecológico de los *RSU* mediante la disminución de: (a) las emisiones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  en el proceso industrial y (b) las materias primas.

Se realizó el cálculo del poder calorífico de los residuos sólidos urbanos, específicamente la fracción restante no reutilizable o reciclable de los residuos sólidos municipales generados en la provincia, usando información secundaria

sobre su producción y composición. El propósito es contribuir, entre otros, con datos que favorezcan la implementación de tecnologías para la mitigación del impacto ambiental de las emisiones atmosféricas producto del uso actual del carbón en el proceso y reemplazándolo por una biomasa con poder calorífico de interés industrial.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estimó la generación de *RSU* con potencial combustible a partir de los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (*DANE*) 2005 y proyectados al 2013, considerando un incremento poblacional urbano de 1,5

en los 17 municipios de la provincia estudiados. Se llevó a cabo el análisis de su composición química teórica a partir del peso en base seca de cada uno de sus componentes. Asimismo, se determinó, por medio de la ecuación de Dulong modificada, el cálculo del valor calorífico más alto (higher heat value, *HHV*) para el residuo a partir de su composición y se utilizó para el cálculo el porcentaje de reemplazo de carbón mineral por combustible derivado de residuos potenciales. Se determinó, además, el ahorro de CO<sub>2</sub> emitido en toneladas equivalentes utilizando los factores de la Organización Latinoamericana de Energía (*OLADE*) y el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (International Panel of Climate Change, *IPCC*)–Unidad de Planeación Minero Energética (*UPME*).

### 3. DISCUSIÓN

Las compañías productoras de cemento en el mundo adelantan procesos de investigación e innovación tecnológica con miras a realizar producción más limpia y a reducir los costos de producción y los costos socio-ambientales de su actividad. La producción de cemento en sus diferentes clases requiere el uso de fuentes de energía. En la actualidad, el carbón es la principal fuente de este factor determinante de la producción. Aproximadamente, el 68% de las fábricas de clínker emplean combustibles alternativos con un consumo total equivalente igual a 3,5 millones de toneladas de carbón (Nithikul, 2007).

Por otra parte, para conseguir las temperaturas demandadas en el proceso de elaboración del cemento, se requiere de energía combustible y eléctrica que representa los mayores costos en la fabricación del cemento. La energía requerida para fabricar 1 Kg de clínker es de 4,31 MJ. Lo anterior significa que, por término medio, el 90% de la energía proviene de los combustibles y el 10% de la electricidad. En la actualidad, el requerimiento energético se suple empleando carbón y fuel óleo. Sin embargo, el empleo y la explotación de estos combustibles acarrear impactos ambientales desfavorables. Otra manera de conseguir una economía energética consiste en utilizar combustibles de sustitución mediante la valoración energética de residuos sólidos municipales.

La industria cementera en San Gil produce cemento petrolero en una cantidad aproximada de 4.500 Ton/mes, con variaciones ajustadas al mercado. En esta planta, para producir una tonelada de clínker, se requiere quemar en los hornos de pre-calcinamiento y calcinamiento una cantidad igual a 0,165 toneladas de carbón mineral. El poder calorífico del carbón utilizado oscila entre 6.600 y 7.200 Kcal/Kg, a un costo aproximado de COL\$170.000 por tonelada. Aproximadamente, se utilizan 900 Ton/mes (J. Estrada, comunicación personal, 2013).

En el sector cementero, el impacto científico y tecnológico del uso de energías renovables que reemplacen a los combustibles fósiles se mide en términos del potencial

de uso de una energía alternativa renovable que le permite cumplir con los compromisos de gestión ambiental empresarial. La valoración energética de los residuos para su uso en co-procesamiento en los hornos de clínker de la industria cementera en la provincia de Guanentá y en el país no es usual. Esta sería la primera de las experiencias empresariales locales en ese sector que le apunta a reemplazar el uso de carbón como combustible para reducir la emisión local de *GEI* y, de paso, generar una dinámica provincial moderna frente al manejo de los *RSU* acorde con el enfoque de la gestión de flujo de materiales y energía.

#### 3.1 Porcentaje de reemplazo de carbón mineral por *RDF*

La planta cementera en San Gil produce aproximadamente 4.500 Ton/mes de clínker. Los requerimientos de energía del proceso de producción del clínker son de 4,31 MJ/Kg. Mientras que el de carbón mineral (en Ton/mes) es de 0,17 por cada tonelada de clínker producido. Dado a que se producen 4.500 Ton/mes de Clínker, se requieren entonces 765 Ton/mes.

De acuerdo con *OLADE*, el poder calorífico del carbón mineral es de 7000 Kcal/Kg. Por tanto, si se utilizan 765 toneladas de carbón mineral al mes y cada Kg del mismo contiene 7000 Kcal/Kg, esto quiere decir que el total de Kcal (o su equivalente calorífico) requiere 22,18 TJ/mes. Es importante anotar que el requerimiento de *RDF* para sustituir el 100% del carbón mineral en la planta es de 19.395.000 MJ/Kg.

Ahora, de acuerdo al cálculo del valor calorífico teórico para los componentes del *RSU* de la provincia de Guanentá y usando la ecuación modificada de Dulong (Gendebien, 2003) como método para el cálculo, la composición teórica más posible y el valor calorífico del *RDF* que puede ser utilizado en la provincia sería como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Poder calorífico teórico de los componentes del *RDF* potencial elaborado a partir de los *RSU* de la Provincia de Guanentá.

Componente de <i>RDF</i>	Poder calorífico (MJ/Kg)
Papel	0,424
Cartón	0,276
Residuos de jardín	2,086
Residuos de textiles	3,599
Residuos de madera	1,411
Residuos de plástico	0,746
<b>Total</b>	<b>8,542</b>

Sin embargo, se anota que no se descartan otras fórmulas de composición en atención a la posibilidad de incluir parte del material pre-procesado que se origina del residuo sólido orgánico cuyo tamaño de partícula cumpla los requerimientos técnicos para ser procesado como *RDF*.

La importancia de lograr en la práctica otras formulaciones radica en la oportunidad de incrementar el valor calorífico del *RDF* producido que cumpla con las condiciones ambientales de seguridad establecidas por la norma internacional. Un incremento del poder calorífico del *RDF* producido incrementa el porcentaje de remplazo de carbón mineral como combustible y podría viabilizar económicamente el proceso.

En teoría, podría alcanzarse un *RDF* con hasta un 11454 MJ/Kg. En la actualidad, no se realiza en la provincia un programa de gestión de residuos para el aprovechamiento material y energético de los residuos generados. Entonces, si el requerimiento calorífico del proceso de producción de clínker en la planta es de 19.395.000 MJ/Kg/mes y considerando la posibilidad de producir un *RDF* con un poder calorífico teórico de 8,542 MJ/Kg y usando las fracciones señaladas en la Tabla 1 (asumiendo una gestión nula igual a la realidad local), esto hace que el requerimiento de ese *RDF* es de aproximadamente 2.270,5 Ton/mes de *RDF*. Sin embargo, de acuerdo con la generación mensual de *RSU* de la provincia de Guantán, que es igual a 1.525 Ton/mes y considerando el balance de masas simplificado modificado de Nithikul (2007), del cual se deduce que del total de residuo de entrada al proceso sólo se espera que un 8% sirva como *RDF*. La producción de *RDF* de alta calidad sólo se podría generar en una cantidad igual a 122 Ton/mes, lo cual equivale al 54% del total de *RDF* requerido para la producción total de clínker/mes.

### 3.2 Emisiones de *GEI* ( $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{SO}$ , $\text{CH}_4$ y $\text{N}_2\text{O}$ ) en toneladas equivalentes

Se calculó las Ton/mes emitidas de *GEI*, hidrocarburos (*HC*), material particulado  $\text{PM}_{10}$  y gases totales considerando el cálculo de los Tj/mes de energía calorífica utilizados y teniendo en cuenta el factor de emisión para el  $\text{CO}_2$  (*IPCC-UPME*). El resultado se observa en la Tabla 2.

De acuerdo con los cálculos para *GEI*, puede señalarse que la emisión más representativa corresponde al  $\text{SO}_2$  con más de 15.000 Ton/mes emitidas, seguido de hidrocarburos con aproximadamente 6.000 Ton/mes y  $\text{CO}_2$  con más de 2.000 Ton/mes.

### 3.3 Emisiones de carbono neutral esperadas en el proceso por el remplazo con *RDF*

El potencial en toneladas de *RDF* es de 108.000 Kg/mes con un poder calorífico teórico mínimo de 8,542 MJ/Kg. La energía contenida es de 922.536 MJ o 0,922 Tj. Las emisiones evitadas de  $\text{CO}_2$  son de 70,75 Ton/mes cuando se usa el factor de emisión de *IPCC-UPME* para  $\text{CO}_2$  y el combustible es una biomasa sólida igual a 0,076743 Gigagramos (Gg) de  $\text{CO}_2/\text{Tj}$ . De la misma manera, y siguiendo los factores de emisión aprobados por *IPCC-UPME* para Colombia, el valor en toneladas de emisiones evitadas para cada gas puede observarse en la Tabla 3.

Tabla 2. Emisiones de *GEI* del proceso productivo

<i>GEI</i> emitido	Energía del proceso (Tj)	Factor de conversión <i>IPCC-UPME</i> 2010 ( $\text{KgCO}_2/\text{mes}$ )	Emisiones de <i>GEI</i> (Ton/mes)
$\text{CO}_2$	22,18	94425	2094,50
$\text{CO}$	22,18	20	443,60
$\text{SO}_2$	22,18	692	15.348,50
$\text{CH}_4$	22,18	1,0	22,10
$\text{N}_2\text{O}$	22,18	14	31,10
<b>Total mes</b>			<b>17901</b>
<b>Emisiones de <i>GEI</i> (Ton/año)</b>			<b>214.815</b>
<b>Otros gases y materiales de interés ambiental</b>			
$\text{HC}$	22,18	259	5.744,60
$\text{PM}_{10}$	22,18	-	22,18

Tabla 3. Emisiones de *GEI* usando *RDF* de remplazo por carbón mineral en la planta de clínker de San Gil

<i>GEI</i> emitido	Energía del proceso (Tj)	Factor de conversión <i>IPCC-UPME</i> 2010 ( $\text{KgCO}_2/\text{mes}$ )	Emisiones de <i>GEI</i> (Ton/mes)
$\text{CO}_2$	0,922	0,076	70,75
$\text{CO}$	0,922	1000	922,00
$\text{SO}_2$	0,922	-	0,92
$\text{CH}_4$	0,922	30	27,66
$\text{N}_2\text{O}$	0,922	4,0	3,69
<b>Total mes</b>			<b>1025,02</b>
<b>Emisiones de <i>GEI</i> (Ton/mes)</b>			<b>12.300,24</b>
<b>Otros gases y material de interés ambiental</b>			
$\text{HC}$	0,922	-	0,922
$\text{MP}_{10}$	0,922	-	0,922

Las emisiones de carbono neutral generadas por el remplazo del carbón mineral por *RDF* en la planta son de aproximadamente el 5,72% de las emisiones normales del proceso. Como se señaló anteriormente, si se incrementa el poder calorífico del *RDF* utilizado en planta en cogeneración, se espera un incremento de emisiones carbono neutral, lo cual sería ambientalmente muy positivo.

## 4. DISCUSIÓN

Por naturaleza, la mayoría de los procesos de gestión de residuos sólidos son una fuente de emisiones de *GEI*. El  $\text{CH}_4$  es 21 veces más activo que el  $\text{CO}_2$ ; por tanto, la opción de

generación de energía alternativa –vía el aprovechamiento energético de los *RSU*– aparte de jugar un papel muy importante en la gestión ambiental de la empresa cementera, ayudará a mitigar el impacto actual de los *GEI* en el relleno sanitario, acorde con la política nacional de desarrollo bajo en carbono.

Con base en consideraciones técnicas y ambientales referidas en este estudio, el análisis de la combustión de *RDF* en el horno de cemento sugiere que no tiene que ser instalada una técnica de combustión especial, excepto que haya que implementar un sistema de producción y manejo del *RDF* en la alimentación del horno que garantice la eficiencia del proceso y la calidad del producto. Un aspecto clave para utilizar un combustible alternativo como *RDF* es entender las condiciones reales de proceso del horno de cemento antes de su uso. En cualquier horno de cemento se puede utilizar residuo sólido municipal. No obstante, un horno como el de la planta de San Gil no fue diseñado para procesarlos; por consiguiente, es arriesgado hacer suposiciones y sentar las bases del proyecto de utilización de *RDF* sin verificar este elemento clave del proceso. En consecuencia, esto obliga a llevar a cabo un análisis de alto nivel antes de su utilización y evaluar las potencialidades específicas y las limitaciones de la planta con respecto al coprocesamiento de *RSU* como *RDF*, incluso una futura utilización de biogas o calor en sus procesos.

## 5. CONCLUSIONES

Si se usa carbón mineral en la producción industrial del clínker se requieren 22,18 TJ para producir 4.500 toneladas. Además, el ahorro de  $\text{CO}_2$  emitido es de aproximadamente un (1) TJ si se reemplaza el 54% del carbón por *RDF* de un poder calorífico de 8,542 MJ/Kg. Por otra parte, si con 22,18 TJ se emiten 2.094,5 Ton/mes de  $\text{CO}_2$ , con 21,2 TJ se emiten 1.999,9 toneladas de  $\text{CO}_2$ , lo cual quiere decir que se emiten 94 Ton/mes de *GEI* menos, esto es, una reducción de 1.128 Ton/año. Asimismo, la potencialidad del *RDF* se puede incrementar hasta el 25,7% si se utiliza el material residual con poder calorífico para producir un *RDF* de menor calidad como puede evidenciarse en balance de masas simplificado. Por último, se debe ampliar el análisis al cálculo de emisiones en el relleno sanitario El Cucharó, ya que, al derivar al menos el 23% del material con características especiales para la producción de *RDF*, se está evitando la generación de una proporción de los *GEI* actualmente producidos en el relleno y emitidos a la atmósfera (calculados en términos de metano y dióxido de carbono) provenientes de la degradación de los residuos rápidamente degradables igual a 8,6 y 78  $\text{m}^3$  y lentamente biodegradables de 74 y 5,3  $\text{m}^3$ , respectivamente.

**AGRADECIMIENTOS** Los autores agradecen especialmente a UNISANGIL por el apoyo a la realización del proyecto.

## REFERENCIAS

- DANE. (2005). *Censo General Perfiles Censo General Municipal*. Recuperado de [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=307&Itemid=124](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=307&Itemid=124)
- Díaz, M. (2004). Valorización energética de residuos en la industria Española de Cemento. *Revista Técnica de Cemento Hormigón*, 869, 8-30.
- Gendebien, A. et al. (2003). *Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives Final Report*. European Commission.
- Nithikul, J. (2007). Potential of Refuse Derived Fuel Production from Bangkok Municipal Solid Waste. *Asian Institute of Technology. School of Environment, Resources and Development*, pp. 18-22. Tailandia.
- Pavesi, G. & María, F. D. (2006). *RDF to energy plant for a central Italian region SUW management system: Energetic and economic analysis. Applied Thermal Engineering*, 2, pp. 1291-1300.