

**ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA  
PARA PROYECTOS DEL PROGRAMA DE MECANISMO  
DE DESARROLLO LIMPIO**

**POWER GENERATION FROM BIOMASS ESTIMATION FOR PROJECTS OF THE  
CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM PROGRAM**

R. Flores\*, R. Muñoz-Ledo, B. B. Flores y K. I. Cano

*Instituto de Investigaciones Eléctricas, Calle Reforma 113, Colonia Palmira, Cuernavaca 62640, México.*

Recibido 19 de Junio 2007; Aceptado 31 de Enero 2008

**Resumen**

En el presente trabajo se estima la cantidad de energía y reducción de emisiones de gases efecto invernadero que podría obtenerse mediante el aprovechamiento de desechos industriales y municipales en el estado de Morelos, tales como el bagazo de caña y la basura municipal. El uso adecuado de estos desechos podría generar hasta un 28% de los requerimientos energéticos del estado de Morelos reportados en el 2005. Asimismo, a través del programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio se podría negociar certificados de carbono para que los países industrializados cumplan las metas estipuladas en el Protocolo de Kyoto, y el estado de Morelos obtenga la inversión necesaria para estar a la vanguardia tecnológica en la utilización de desechos orgánicos para la generación de energía y reducción de gases efecto invernadero.

*Palabras clave:* mecanismo de desarrollo limpio, bagazo de caña, basura municipal, gas de relleno sanitario, generación de energía, emisión de gases efecto invernadero.

**Abstract**

In the present work, it is calculated the amount of energy and the reductions of greenhouse gases emissions that may be obtained taking advantage of organic wastes, such as, sugarcane bagasse and urban wastes. The appropriate use of these wastes could generate up to 28% of the power requirements reported for the state of Morelos in 2005. Likewise, the Clean Development Mechanism could be employed to negotiate carbon certificates in such a way that the industrialized countries could meet with the goals implemented in the Kyoto Protocol and the state of Morelos could get the financial resources to be in the front technologic line with respect to the utilization of organic wastes to generate power and to reduce greenhouse gases emissions.

*Keywords:* clean development mechanism, sugarcane bagasse, municipal waste, landfill gas, power generation, greenhouse gases emissions.

**1. Introducción**

La forma tradicional de producción de energía es mediante la combustión de combustibles fósiles, generando a su vez gases efecto invernadero (GEI's), lo cual es un problema grave de contaminación ambiental. Una alternativa es el uso de fuentes renovables; no obstante, la tecnología para el aprovechamiento de estas fuentes se encuentra en desarrollo, por lo que se presentan problemas financieros para su implementación. Es por eso, que se deben buscar programas que ayuden a solventar estos problemas y lograr la ejecución de proyectos que aprovechen el uso de fuentes renovables, tal y como es el caso del Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y los certificados de carbono. Las transferencias potenciales que se

pueden lograr mediante el programa de MDL son significantes; ya que se estima que la demanda promedio de certificados de carbono para el año 2010 será de 250 Tg CO<sub>2</sub>/año a un precio de US\$11/Mg CO<sub>2</sub> (Haites, 2004). De esta manera, proyectos que por sí solos no son rentables, pueden serlo mediante la venta de los certificados de carbono obtenido por su implementación.

En el caso de estado de Morelos, uno de sus principales cultivos es la caña de azúcar, que una vez procesa genera como residuo el bagazo de caña el cual se usa en diversas industrias tales como la papelera, maderera, entre otras; así como forraje para el ganado vacuno y porcino (Mbohwa, 2003; Lobo y col., 2007; Restuti y Michaelowa, 2007). No obstante, su aplicación en la generación de energía brinda la posibilidad de obtener energía limpia,

\* Autor para la correspondencia: E-mail: rfv@iie.org.mx  
Fax: +52 777 362 3832

debido a que las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas no se consideran como un incremento en la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera, ya que la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido fue previamente abatido durante el crecimiento de la caña de azúcar. Asimismo, brinda la posibilidad de usar fuentes alternativas a los combustibles fósiles, con lo cual las reservas petroleras pueden alargarse un periodo de tiempo más largo, o bien, usarse para otro tipo de aplicaciones.

Por otra parte, la disposición final de la basura municipal es un grave problema, tanto político como tecnológico, ya que no se cuenta con espacios suficiente para la acumulación de basura, y en los lugares potenciales, los habitantes se rehusan a permitir la construcción de un relleno sanitario por falta de información apropiada acerca de los beneficios y comodidades que presentan dichos complejos. Por ejemplo, en el año 2006, se presentó un grave problema con la disposición de la basura del municipio de Cuernavaca, Morelos, y la colecta se suspendió por varios días, originando graves problemas a los habitantes. Por otro lado, se presentan problemas técnicos debido a la contaminación del agua, los malos olores, daños a la vegetación, y la emisión de GEI's por la descomposición de la basura orgánica. Por lo tanto, es importante la construcción de rellenos sanitarios que permitan la captura de GEI's y que éstos puedan emplearse en la generación de energía o simplemente procesarse para reducir su potencial de calentamiento (Prasertsan y Sajjakulnukit, 2006; Themelis y Ulloa, 2007; Tsai, 2007).

## 2. Metodología.

Para las estimaciones de la energía potencial que se puede obtener a partir de biomasa generada en el estado de Morelos, se partió de datos estadísticos reportados en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)) con respecto a la cantidad de basura recolectada, así como de los datos mostrados por la Unión Nacional de Cañeros, A. C.-CNPR (<http://www.cañeros.org.mx>) con respecto a los resultados de la zafra de los últimos años. Asimismo, en el caso de las estimaciones de metano producido en el relleno sanitario, se hizo uso del software **LandGEM** (Landfill Gas Emission Model) v. 3.02 desarrollado por el *National Risk Management Research Laboratory (NRMRL)* y el *Clean Air Technology Center (CATC)* para la *U. S. Environmental Protection Agency (EPA)*. A partir de estos datos, y siguiendo las instrucciones del *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* (IPCC, del inglés) para obtener un factor de emisión de 0.147 Mg CO<sub>2eq</sub>/GJ, es posible estimar la cantidad de certificados de carbono potenciales debido al uso apropiado de algunos de los desechos orgánicos producidos en el Estado de Morelos.

## 3. Resultados y Discusión.

### 3.1. Uso de bagazo de caña para generación de energía.

A partir de la zafra 2004/05 reportadas en las Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar de la Unión Nacional de Cañeros, A. C.-CNPR, se obtiene que el Estado de Morelos generó el 3.1% del total de bagazo de caña producido en todo el país, tal y como se puede deducir de la Fig. 1. A su vez, de la misma figura, se observa que el mayor productor de bagazo de caña es el Estado de Veracruz, seguido después por los estados de Jalisco y San Luis Potosí. Por otra parte, de los datos reportados en la Tabla 1, obtenidos también de las estadísticas elaboradas por la Unión Nacional de Cañeros, A. C.-CNPR, se observa un incremento constante en la superficie empleada para el cultivo de la caña de azúcar en el Estado de Morelos, lo cual aunado un rendimiento muy parecido en el transcurso de los años, origina que la cantidad de bagazo de caña generado en la entidad se incremente constantemente.

Por otro lado, la tecnología predominante que se utiliza a nivel mundial para producir energía a partir del bagazo de caña es mediante el ciclo Rankine, el cual consiste en la combustión directa de la biomasa en una caldera para generar vapor sobrecalentado, el cual posteriormente se expande en una turbina. Asimismo, el calor de desecho de la turbina de vapor se recupera y se usa para cubrir otras necesidades energéticas dentro de la misma planta.

Por otro lado, se puede tomar como referencia que el bagazo de caña tiene un poder calorífico de 8.0 kJ/g, y considerando los datos de la zafra 2004/2005 presentados en la Tabla 1, la cantidad anual de energía potencial a partir del bagazo de caña es de 3,700 TJ. No obstante, es necesario considerar una eficiencia térmica del turbina del 40%, así como una eficiencia de la caldera del 80%, por la que la cantidad potencial de energía obtenida es de 1,185 TJ, los cuales de acuerdo a datos reportados en la Prospectiva del Sector Eléctrico 2006-2015, representan 15.6% de las necesidades energéticas del Estado de Morelos en el año 2005 (SENER, 2006). Por otra parte, para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas por el reemplazo de combustible fósil, se consideran los 3,700 TJ/año, ya que las eficiencias de la caldera y la turbina afectan tanto el combustible fósil como al bagazo de caña. De esta forma, la reducción anual de emisiones sería de 0.545 Tg CO<sub>2eq</sub>, y considerando un valor promedio de US\$11.00 por tonelada de CO<sub>2</sub> reducido, se tendrían prácticamente US\$6,000,000.00 cada año, que se podrían usar para promover y desarrollar la tecnología del aprovechamiento del bagazo de caña para generar energía.

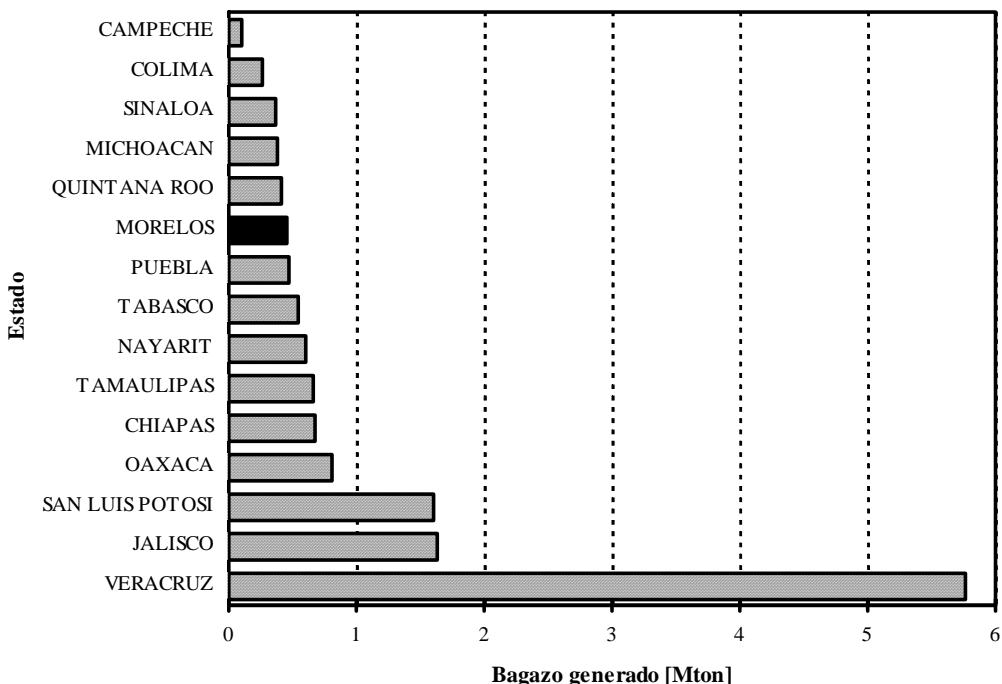


Fig. 1. Producción en México de bagazo de caña en la zafra 2004/05.

Tabla 1. Zafras 2000/01 al 2004/05 en el estado de Morelos.

Zafra	Superficie Industrializada [Ha]	%Territorio del Estado	Rendimiento [ton caña/Ha]	Total de Bagazo obtenido [ton]	Bagazo obtenido [ton/Ha]
2000/01	11,574	2.3	107.6	407,433	35.2
2001/2002	13,000	2.6	103.7	438,934	33.8
2002/2003	12,248	2.5	105.0	402,051	32.8
2003/2004	13,083	2.6	109.2	405,518	31.0
2004/2005	13,621	2.8	114.2	463,188	34.0

### 3.2. Uso de la basura municipal para la generación de energía.

De acuerdo a datos reportados por el INEGI, durante el 2005 se produjeron 512.25 Mg/día de basura en el estado de Morelos con la composición que se muestra en la Tabla 2. A partir de estos datos y considerando que durante 10 años toda la basura municipal se depositará en uno o varios rellenos sanitarios donde se capturará el metano producido durante la degradación anaeróbica de la basura, es posible estimar la cantidad y composición de los gases del relleno sanitario empleando el programa **LandGEM**. El programa utiliza el modelo de decaimiento de primer orden expresado en la siguiente ecuación:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_j} \quad (1)$$

donde  $Q_{CH_4}$  es la generación anual de metano en el año de cálculo (en  $m^3/año$ );  $k$  es una constante que depende de la humedad contenida en la masa de la basura, la disponibilidad de nutrientes para los

microorganismos que se meten a la basura, pH de la basura, y la temperatura promedio del relleno sanitario, en el **LandGEM** por convención, y a reserva de que el usuario lo modifique, toma un valor de 0.05;  $L_0$  es la capacidad potencial de generar metano y depende del tipo y composición de la basura colocada en el relleno, en el caso de la basura generada en el estado de Morelos, este valor corresponde a  $162 m^3/Mg$  de basura;  $M_i$  son las ton de basura anual arrojada al relleno sanitario. Las emisiones de metano generadas en los rellenos sanitarios en donde se agruparía la basura estatal de los próximos 10 años se presenta en la Tabla 3. Es importante remarcar que a pesar de que el relleno sanitario tuviera una vida útil de 10 años, la generación de metano continuaría debido a la degradación de la basura depositada dentro del relleno, por lo que para hacer la estimación de la reducción de emisiones se considera una vida del proyecto de 21 años.

Para el caso de proyectos para el Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio aprovechando el

metano generado en rellenos sanitarios, se tienen dos opciones. La primera y más simple de ellas, es simplemente quemar el metano, del tal manera que en lugar de liberar metano a la atmósfera, se emita CO<sub>2</sub>, ya que éste último tiene un potencial de calentamiento global 21 veces menor con respecto al metano. De esta manera, las emisiones globales de GEI's se reducirían 21 veces. La segunda opción es emplear el metano producido como combustible para generar energía, utilizando principalmente la tecnología de turbogas. En este sistema el metano no únicamente se transforma en CO<sub>2</sub>, reduciendo así el potencial de calentamiento de las emisiones, sino que también desplaza combustible fósil, que sería empleando para la generación de energía. Debido a que el metano se genera a partir de los desechos orgánicos, al igual que en el caso del bagazo de caña, se considera que no existen emisiones globales de CO<sub>2</sub> durante la generación de energía en las unidades de turbogas. En la Tabla 3 se presenta la cantidad de energía que podría generarse a partir del metano producido durante los diferentes años contemplados en el proyecto. La contribución a la energía requerida en el estado es menor en comparación con la energía que se podría obtener a partir del bagazo de caña, ya que en promedio durante la duración del proyecto se producirían 947 TJ/año, lo cual representa el 12.5% de las necesidades energéticas del Estado. Es importante resaltar que no todo el metano se usa para producir energía debido a restricciones técnicas, y el metano restante únicamente se quema reduciendo el potencial de calentamiento global de las emisiones. Para el cálculo de la reducción de emisiones por el combustible fósil desplazado se consideró un factor de emisión de 0.147 Mg CO<sub>2eq</sub>/GJ. A partir de esta información, se obtiene que en promedio la reducción anual de emisiones de GEI's sea de 5.9 Tg CO<sub>2eq</sub>, lo cual al cabo de 21 años, la duración del proyecto, el total sea de 123. 9 Tg CO<sub>2eq</sub>. Considerando una vez más, un costo promedio de US\$11.00 cada Mg CO<sub>2eq</sub> reducido, se obtiene un total de 1,363 millones de dólares para financiar la construcción de uno o varios rellenos sanitarios en el Estado de Morelos.

Tabla 2. Clasificación de la basura en el estado de Morelos.

Tipo de Basura	%
Papel, cartón, productos de papel	14.41
Textiles	1.49
Plásticos	5.96
Vidrios	5.96
Metales	2.98
Aluminio	1.99
Ferroso	0.99
Otros ferrosos	0.60
Basura comida, jardines materiales orgánicos similares	49.70
Otro tipo de basura (pañales desechables)	15.90

Tabla 3. Generación de metano y energía a partir de la basura colectada en el Estado de Morelos.

Año	Metano generado [Mm <sup>3</sup> ]	Energía anual producida [GWh]
2007	0	0
2008	4.652	44
2009	9.171	88
2010	13.56	131
2011	17.84	175
2012	22.01	175
2013	26.07	175
2014	30.04	263
2015	33.92	307
2016	37.71	350
2017	41.43	350
2018	45.08	394
2019	42.88	394
2020	40.79	394
2021	38.80	394
2022	36.91	350
2023	35.11	350
2024	33.40	307
2025	31.77	307
2026	30.22	307
2027	28.75	263

### Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado la viabilidad técnica para el uso de desechos municipales e industriales producidos en el estado de Morelos, específicamente la basura y el bagazo de caña, para la generación de energía con combustibles alternos y la reducción de gases efecto invernadero. Se ha demostrado que el aprovechamiento del bagazo de caña podría satisfacer hasta un 15.6% de los requerimientos energéticos actuales del Estado, y la captura y uso de metano producido durante la descomposición de la basura municipal abastecería el 12.5% de electricidad del estado. A su vez, se ha estimado que mediante el programa de MDL se tendría una buena cantidad de recursos financieros para promover el desarrollo tecnológico que permita el uso de estos desechos en la generación de energía y reducción de emisiones, y que el estado de Morelos esté a la vanguardia tecnológica para el buen uso de desechos orgánicos.

### Referencias

- Haites, E. (2004). Estimating the market potential for the clean development mechanism: review of models and lessons learned, report no. 19, PCFplus: Washington, DC.
- Lobo, P. C., Jaguaribe, E. F., Rodrigues, J., y da Rocha, F. A. A. (2007). Economics of

- alternative sugar cane milling options. *Applied Thermal Engineering* 27, 1405-1413.
- Mbohwa, C. (2003). Bagasse energy cogeneration potencial in the Zimabwean sugar industry. *Renewable Energy* 28, 191-204.
- Prasertsan, S., y Sajjakulnukit, B. (2006). Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers. *Renewable Energy* 31, 599-610.
- Restuti, D., y Michaelowa, A. (2007). The economic potential of bagasse cogeneration as CDM projects in Indonesia. *Energy Policy* 35, 3952-3966.
- SENER (2006). Prospectiva del sector eléctrico 2006-2015.
- Themelis, N. J., y Ulloa, P. A. (2007). Methane generation in landfills. *Renewable Energy* 32, 1243-1257.
- Tsai, W. T. (2007). Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 331-344.