

ENERGÍA DISPONIBLE A PARTIR DE BIOMASA DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

AVAILABLE ENERGY FROM SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) BIOMASS RESIDUES

Debernardi-De La Vequía, H.^{1*}; Ortiz-Laurel, H¹; Rosas-Calleja, D¹.

¹Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba, km 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94946. México.

*Autor de correspondencia: Debernardi@colpos.mx

RESUMEN

La biomasa generada por el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México es un factor importante en términos de energía renovable: En la cosecha 2013-2014 se molieron 52,246508 t de caña en 52 ingenios azucareros, y la biomasa aprovechable energéticamente de la caña, es el bagazo y puntas de tallo. El bagazo representa 30% de los tallos cosechables y es el residuo fibroso que resulta del proceso para extraer el azúcar; se obtiene con 50% de humedad promedio; equivalente a 19.5 t ha⁻¹ de bagazo y 3.9 t ha⁻¹ de combustible. Las puntas son el residuo vegetal que queda en campo después de la cosecha y contienen 80% de humedad, representando en promedio 25% del rendimiento, equivalente a 16.8 t ha⁻¹, equivalentes a 2.5 t ha⁻¹ de combustible. Estos valores se determinaron con bomba calorimétrica y para el cálculo se consideró el poder calorífico inferior de la biomasa, para lo cual se calculó el calor latente de vaporización para obtener el rendimiento energético, en términos de energía neta. La equivalencia en energía aprovechable fue de 57 277 234.6 TJ, considerando las puntas y el bagazo. El proceso para la obtención del azúcar se puede realizar sin utilizar combustibles fósiles o energía adicional a la que produce el bagazo, cuando el consumo de energía mecánica es de entre 25-30 kWh t⁻¹ de caña y un consumo de vapor para el proceso entre 450-550 kg t⁻¹ de caña. Así, el valor energético equivalente obtenible de una tonelada de caña de azúcar oscila entre 1.15 y 1.31 barriles de petróleo, por lo tanto, el valor de la energía disponible total en la cosecha de referencia sería de 9 870 441.88 barriles de petróleo.

Palabras clave: Biomasa, poder calorífico, bioenergía, residuos.

ABSTRACT

The biomass generated from sugar cane (*Saccharum* spp.) cultivation in México is an important factor in terms of renewable energy. In the 2013-2014 harvest, 52,246508 t of sugar cane were milled in 52 sugar plants, and the energetically usable sugar cane biomass is sugar pulp and tips of the stalks. The sugar pulp represents 30 % of the harvestable stalks and it is the fibrous residue that results from the process used to extract sugar; it is obtained with an average of 50 % moisture, equivalent to 19.5 t ha⁻¹ of sugar pulp and 3.9 t ha⁻¹ of fuel. The tips are the plant residue that is left on the field after the harvest and they contain 80 % moisture, representing in average 25 % of the yield, equivalent to 16.8 t ha⁻¹, that are equivalent to 2.5 t ha⁻¹ of fuel. These values are determined with a calorimetric pump and for the calculation, the lower calorific power of the biomass was considered; for this purpose, the latent vaporization heat was calculated to obtain the energetic yield, in terms of net energy. The equivalence in usable energy was 57 277 234.6 TJ, considering the tips and the sugar pulp. The process used to obtain sugar can be carried out without using fossil fuels or additional energy to what is produced by the sugar pulp, since the mechanical energy consumption is 25–30 kWh t⁻¹ of sugar cane and vapor consumption for the process is 450-550 kg t⁻¹ of the sugar cane. Thus, the equivalent energetic value obtained from one ton of sugar cane ranges from 1.15 to 1.31 barrels of oil; therefore, the total available energy value in the harvest of reference would be 9 870 441.88 barrels of petroleum.

Keywords: Biomass, calorific power, bioenergy, residues.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 7, julio, 2016. pp: 68-73.

Recibido: mayo, 2016. **Aceptado:** junio, 2016.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera Mexicana es de gran importancia en la economía para el medio rural; genera aproximadamente más de dos millones de empleos, tanto en forma directa como indirecta; se desarrolla en 15 entidades federativas y 227 municipios, que aportan un valor a la producción primaria cercano a los 30 mil millones de pesos (CONADESU-CA, 2014). La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, señala a éstos como a los combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades agrícola, pecuaria, silvícola, acuícola, residuos domésticos, comerciales, industriales, de microorganismos, enzimas, así como sus derivados, producidos por procesos tecnológicos sostenibles que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos de esta Ley, atendiendo a lo dispuesto en el artículo 1 fracción I de este ordenamiento (DOF, 2008). La generación de energía a partir de la biomasa de caña de azúcar tiene potencial, sin embargo, en México hasta la fecha, no se ha aprovechado a plenitud. Primeramente, existe la necesidad de desarrollar la tecnología necesaria para implementar acciones de recuperación de ésta biomasa, así como para su uso como combustible complementario al bagazo de la caña de azúcar en las regiones cañeras de México a un costo atractivo, y sin obstaculizar las operaciones de campo durante la zafra. Lo anterior se puede lograr, diseñando un programa de cosecha en verde o por lo menos implementando la no requema de residuos de cosecha. Los cuales además de traer beneficios ambientales, aumentarían la factibilidad de cogenerar energía

eléctrica. La biomasa aprovechable energéticamente a partir de la caña de azúcar, es el bagazo y la punta de caña o cogollos (RAC). El bagazo representa aproximadamente 30% de los tallos zafrables y es el residuo fibroso de este proceso, el cual se obtiene con el 48% a 55 % de humedad. En términos de energía, 1 kg de bagazo es igual a 37.5 MJ, lo que significa que en México se pueden obtener por zafra 19.5 t ha⁻¹ de bagazo, equivalentes a 3.9 t ha⁻¹ de combustible, lo anterior considerando que un barril de petróleo equivale en términos de energía a 13.86×10⁵ kcal t⁻¹. Bajo las condiciones operativas del campo cañero en México, la energía aprovechable en términos de barriles de petróleo oscila desde 1.15 a 1.31 barriles de petróleo por tonelada de caña, valor que incluye también a los azúcares presentes en la caña, cuyo porcentaje varía de entre 15.5% a 16.5% con un valor energético promedio de 6.10×10⁵ kcal t⁻¹ de caña, para el bagazo su valor energético promedio fue de 5.98×10⁵ kcal t⁻¹, mientras que para la paja o "tlazole" el valor promedio fue 5.10 x 10⁵ kcal t⁻¹, por lo que una tonelada de caña en términos de energía equivale a 17.18×10⁵ kcal t⁻¹.

Lo anterior indica la importancia que tiene la producción de biomasa generada por el cultivo de la caña de azúcar; que en la zafra 2012-2013 en México, produjo aproximadamente el equivalente en energía a 8 362 813 barriles de petróleo, este valor corresponde a los cálculos realizados en base a caña molida durante esta zafra. La cantidad de bagazo obtenida fue de 12 671 622 t, mientras que la de paja o tlazole fue de 7 859 308 t (Debernardi, 2013). Con base en lo anterior, se determinó la disponibilidad de energía en las regiones cañeras de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se muestrearon 15 sitios sembrados con caña de azúcar en las diferentes regiones cañeras de México. En la selección de los sitios se consideraron las variedades de caña de azúcar MEX69-290 y CP70-2086; la primera de ciclo de madurez medio y la segunda de maduración temprana, durante sus ciclos planta, soca y resoca. Esto debido a que dichas variedades se encuentran ampliamente distribuidas en el campo cañero Mexicano en sus diferentes regiones cañeras (Figura 1). Se determinó el poder calorífico inferior (PCI), con una bomba calorimétrica Marca Leco AC-350. Para la determinación del PCI se utilizó de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{M_S C_{vS} \Delta T - e_1 - e_2}{M_C}$$

$$e_2 = m \cdot h$$

Donde M_S es la masa de la bomba calorimétrica (masa del sistema); C_{vS} es el calor específico promedio de la bomba calorimétrica (calor específico del sistema); ΔT es el cambio de temperatura registrado durante las pruebas; H es el poder calorífico del combustible; e_1 es la corrección por el calor que libera la formación de ácidos de nitrógeno y azufre; e_2 es la corrección por el calor generado por la combustión del filamento de ignición; m es la masa o longitud del filamento de ignición; h es el poder calorífico del filamento por unidad de masa o longitud; M_C es la masa de combustible.

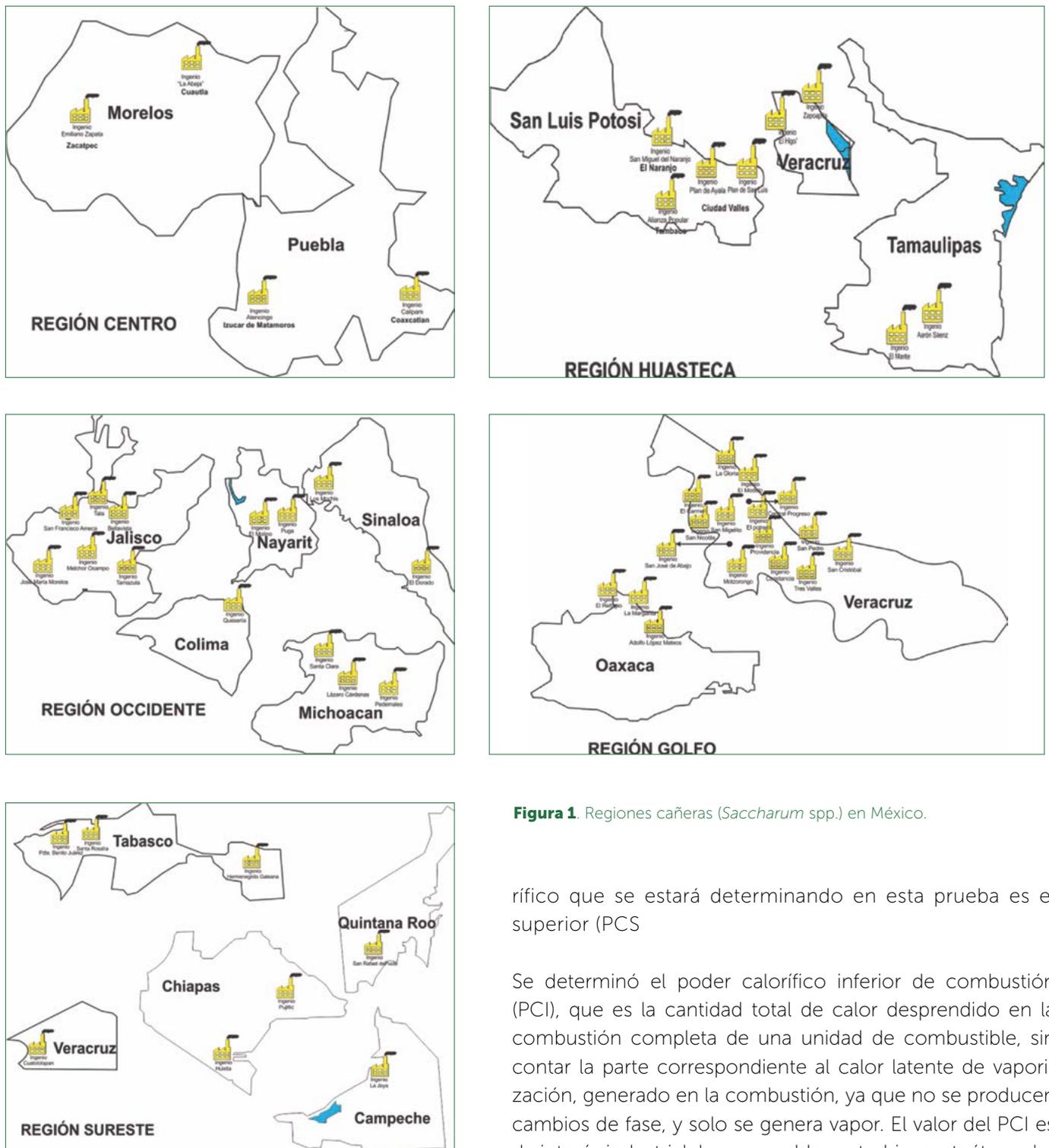


Figura 1. Regiones cañeras (*Saccharum* spp.) en México.

rífico que se estará determinando en esta prueba es el superior (PCS)

Se determinó el poder calorífico inferior de combustión (PCI), que es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de combustible, sin contar la parte correspondiente al calor latente de vaporización, generado en la combustión, ya que no se producen cambios de fase, y solo se genera vapor. El valor del PCI es de interés industrial: hornos, calderas, turbinas, etcétera, debido a que los gases de escape producto de la combustión

tienen normalmente temperaturas elevadas, y por lo tanto el agua en fase vapor no se condensa. Al PCI se le conoce también como Poder Calórico Neto (PCN), que se puede obtener restándole al Poder Calórico Superior (PCS) el calor latente de vaporización. Para medir el poder calorífico inferior (PCI), las muestras fueron secadas a 70 °C, hasta alcanzar un peso constante en una estufa a corriente de aire durante 72 horas. Los datos obtenidos fueron confirmados utilizando las siguientes ecuaciones utilizadas en la industria azucarera.

Debido a que los gases producidos durante la combustión al final se encuentran a temperaturas bastante bajas, y a que las determinaciones se llevan a cabo a alta presión, la mayor parte del agua presente en los productos se condensa, por lo cual el poder calo-

Ecuaciones para determinar calor de combustión superior e inferior del bagazo:

$$PCS=19255-31.39 \cdot S-192.55 \cdot W, (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}).$$

$$PCI=17790-31.39 \cdot S-203 \cdot W, (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}).$$

Dónde: *S*: contenido de azúcar (%) en bagazo, *W*: humedad (%) en bagazo (Sarría, 1999).

Fórmula simplificada para calcular el Poder calorífico inferior (PCI) del bagazo (Hugot, 1982).

$$PCI=17\,799.3-20\,305.98 \cdot W, (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$PCI (\text{bagazo})=7,646.31 (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

Dónde: *W*: humedad (%) en bagazo.

Formulas propuestas por Upadhiay (1991), para el PCS y PCI:

$$PCS=19\,268 \cdot [1-(W+A)/100], (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}).$$

$$PCI=17\,802 \cdot [1-(W+A)/100], (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}).$$

Dónde: *W*: humedad (%) en bagazo, *A*: cenizas (%).

Las ecuaciones anteriores se utilizaron solamente para corroborar los datos que de forma directa se obtuvieron después de haber obtenido la curva de calibración de la bomba calorimétrica. Se realizó un análisis estadístico para determinar diferencias entre la capacidad de generar biomasa para la variedades utilizadas en este estudio, así como de los rendimientos en términos de biomasa y energía analizando los valores medios de estas variables mediante la Prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la zafra 2013-2014 se molieron 52 246 508 t, en 52 ingenios azucareros, por lo tanto, el PCI promedio obtenido por tonelada de caña molida represen-

tó un total de energía disponible de 57 277 234.6TJ, equivalentes a 9, 870 441.8 barriles de petróleo, de los cuales 3 172 109.7 son barriles quemados en campo correspondientes a cogollos y hojas (tlazole) y 6 698 332.1 son barriles utilizados como fuente de energía en las calderas de los ingenios del país, valores similares a estos fueron reportados por Braunbeck et al. (2005). El Cuadro 1, muestra la disponibilidad y eficiencia energética en las diferentes regiones cañeras para la zafra 2013-2014 en México.

Los datos del Cuadro 1, muestran que las regiones Golfo, Occidente y Huastecas representan 78.2% con 5 237 858.1 barriles de petróleo equivalentes a bagazo de caña, lo cual refleja la importancia que tienen estas tres regiones cañeras. El 21.8% restantes; regiones Sureste y Centro contribuyen con 1 460 474 barriles de petróleo. Las puntas, cogollos y hojas (tlazole) siguen una tendencia similar a la anterior. Con la diferencia de que, esta energía no tiene utilidad actualmente en México, por el contrario causa polución y contaminación ambiental al ser quemada en el mejor de los casos, donde se simula que existe una cultura conservacionista, aunque no se efectúa la operación de campo conocida como "requema", con lo que parte de estos residuos de cosecha son incorporados al suelo y se aprovechan como fuente de materia orgánica. Por lo anterior, a nivel nacional la eficiencia energética promedio es de 0.92 barriles de petróleo por tonelada de azúcar producida (Cuadro 1). La región Golfo es donde se encuentran los ingenios que contribuyen con mayor eficiencia (0.88 barriles de petróleo por tonelada de azúcar producida), mientras que los ingenios con la menor eficiencia (1.09 barriles por tonelada de azúcar producida) corresponden a los ubicados en la región Centro. Lo anterior, permite inferir que además de la falta de estrategias que permitan aprovechar la energía que se quema en campo, es necesario diversificar y modernizar la industria azucarera Mexicana, para aprovechar

Cuadro 1. Energía disponible y eficiencia energética por regiones en el campo cañero Mexicano.

Regiones Cañeras	Energía-bagazo Barriles de petróleo	Energía-tlazole Barriles de petróleo	Eficiencia energética Azúcar-Barriles de petróleo
Centro	467,293.5	232,739.7	1.09
Huastecas	1,273,533.0	569,253.3	0.91
Occidente	1,576,616.6	762,634.0	0.95
Sureste	993,180.7	458,247.4	0.89
Golfo	2,387,708.5	1,149,235.3	0.88
Total	6,698,332.1	3,172,109.7	0.92

de manera eficiente la energía disponible y generar coproductos de mayor valor agregado en los ingenios azucareros. El contenido de biomasa en las variedades estudiadas Mex69-290 y CP70-2086 en condiciones de campo se muestra en el Cuadro 2, de manera general no hubo diferencias significativas ($p < 0.001$) entre las regiones y las variedades. Aunque, en los datos del Cuadro 2, se aprecia una tendencia proporcional al contenido de la biomasa en campo (tlazole) que es similar para las variedades de este estudio, la cual es quemada para facilitar la cosecha manual y representa en promedio 24.8% de la energía total proveniente de la biomasa del campo cañero en México, equivalentes a 3 172 109.7 barriles de petróleo.

Los resultados obtenidos con la bomba calorimétrica para las variedades de caña estudiadas por regiones no mostraron diferencias significativas ($p < 0.001$), no así para las muestras húmedas, por lo que, para este trabajo solo se considera el poder calorífico inferior (PCI). Lo anterior con la finalidad de conocer la equivalencia respecto del petróleo de la biomasa producida en condiciones de campo. La Figura 2, muestra los valores promedio para las variedades Mex69-290 y CP70-

2086. El aprovechamiento de esta biomasa depende de una serie de factores que deberán ser estudiados y desarrollados, dentro de los parámetros más importantes a evaluar son la recolección, transporte, almacenamiento y procesos tecnológicos para transformarla. Oliveiro (2003), reporta resultados similares a los de este trabajo, aunque este autor no menciona la variedad de caña de azúcar con la que se realizó dicho estudio.

CONCLUSIONES

La energía disponible en el campo cañero Mexicano en la zafra 2013-2014 fue de 9 870 441.8 barriles de petróleo, de los cuales 6, 698,332.1 corresponden al bagazo aprovechado por los ingenios y 3 172109.7 barriles de petróleo a las puntas y residuos de cosecha que se queman innecesariamente en campo. Así, la eficiencia energética promedio en los ingenios azucareros fue de 0.92 barriles de petróleo por tonelada de azúcar producida. El cultivo de caña de azúcar constituye el productor de biomasa y biocombustibles de mayor importancia en términos de energía renovable, por lo que, resulta impostergable implementar un esquema de aprovechamiento de esta biomasa.

LITERATURA CITADA

Braunbeck O., Macedo I., Cortez L.A.B. 2005. Modernizing cane production to enhance the biomass base in Brazil. In: Silveira S (ed) Bioenergy—realizing the potential (Coord.). Elsevier, Amsterdam, pp 75–94.

CONADESUCA. 2014. Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar. Zafra 2014-2015. SAGARPA, México, D.F. 548 p.

Debernardi D.H. 2013. Utilización del bagazo como fuente de energía en la industria azucarera. Secretaría de Energía (SENER), análisis energético de la zafra 2012-2013. Simposio Internacional de Energía Renovable, México, D.F. 32 p.

Cuadro 2. Contenido de la biomasa de las variedades Mex69-290 y CP70-2086.

Biomasa	Composición (%)	
	Mex69-290	CP70-2086
hojas verdes y cogollos (tlazole)	18.3 a	18.1 a
hojas secas y residuos (tlazole)	6.8 b	6.4 b
tallos cosechables	74.9 c	75.5 c

Cantidades con letras iguales no son estadísticamente diferentes ($p < 0.001$).

1 tonelada de caña de azúcar = 1.3 barriles de petróleo

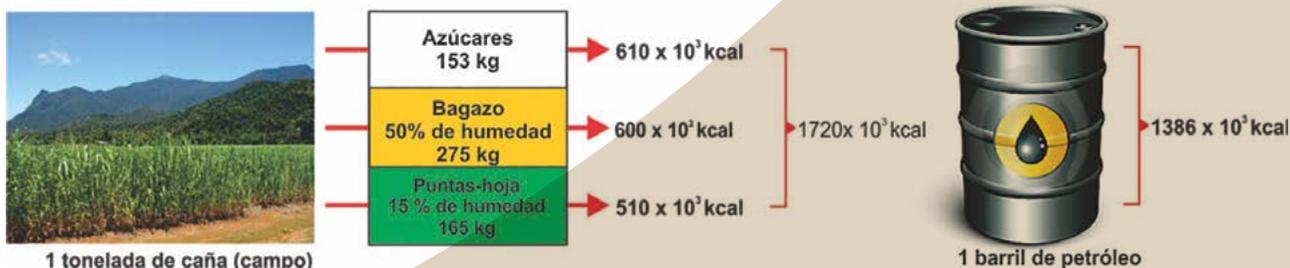


Figura 2. Valores promedio de PCI de disponibilidad de energía para las variedades Mex69-290 y CP70-2086.

- DOF. 2008. Nueva Ley DOF 01-02-2008. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Secretaría General Secretaría de Servicios Parlamentarios Centro de Documentación, Información y Análisis.
- Hugot E. 1982. Manual para Ingenieros Azucareros, sexta reimpresión. Editorial CECSA, México. 803 p.
- Oliveiro J.L. 2003. Fabricação nacional de equipamentos para a produção de álcool e co-geração de Industrias.Seminário – Álcool: Potencial gerador de divisas e empregos, Rio de Janeiro.R1-BNDES, Industrias Dedini, 60 p.
- SAGARPA. 2014. Importancia de la agroindustria de la caña de azúcar. SIAP. Cultivos Agroindustriales, Benjamín Franklin 146, Colonia Escandón Miguel Hidalgo, México D.F., 9 p.
- Sarría L.B. 1999. Aerodinámica de la zona de flujo inverso que se crea en una cámara de combustión que combina un estabilizador rotatorio y un turbulizador estático tangencial. Cuba, Premium Publicity, S. A., 78p.
- Upadhiaya U.C. 1991. Bagasse as a fuel. International Sugar Journal, 93, (1111):132-138.

