

## POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA PAJA DE TRIGO EN EL VALLE DE MEXICALI

Conrado GARCÍA<sup>1,2</sup>, Gisela MONTERO<sup>1</sup>, Marcos CORONADO<sup>1</sup> y Marcela ACOSTA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Calle de la Normal s/n, Col. Insurgentes Este, CP 21280, Mexicali, B.C., México

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Mexicali, Academia de Química y Bioquímica. Av. Tecnológico s/n Col. Elías Calles, CP 21396, Mexicali, B.C., México

\*Autor responsable; cnrdgarcia@gmail.com

*(Recibido agosto 2011, aceptado diciembre 2012)*

Palabras clave: biomasa, energía renovable, paja de trigo, quemadas agrícolas

### RESUMEN

El trigo es uno de los granos que más se cultiva en el mundo debido a su relevancia para la alimentación humana. En el año 2010, la superficie sembrada con trigo grano a nivel nacional fue del orden de 700 585 ha, con una producción de 3 676 707 t. Con ello, el trigo se encuentra entre los principales granos cultivados con mayor superficie sembrada en el país. En 2010 el cultivo de trigo en Baja California representó el 14.4 % de la superficie cultivada de trigo a nivel nacional y el 43.4 % de la superficie agrícola estatal, con 101 161 ha, lo que corresponde a 89 152 ha para el municipio de Mexicali. Como remanente principal de la cosecha se obtiene la paja de trigo, del cual solamente el 15 % tiene aplicaciones diversas y el 85 % restante es considerado como residuo sólido cuya disposición es la quema in situ; esta práctica inapropiada, es utilizada para disponer aproximadamente 553 188 t de paja de trigo. Tales valores representan una opción de biomasa residual que resulta atractiva, desde el punto de vista energético, por los grandes volúmenes disponibles y alto contenido de energía. Por lo tanto, el presente trabajo muestra los resultados de una evaluación de procesos de transformación de 9.57 PJ de energía contenida en la paja de trigo. Tal energía podría utilizarse mediante la combustión para la generación de electricidad, que representa 13.98 % de la capacidad instalada en el parque geotérmico Cerro Prieto (720 MW), ubicado en el Valle de Mexicali y 10.6 veces la capacidad instalada en el parque eólico La Rumorosa (10 MW), localizado en el municipio de Tecate. Otra alternativa de transformación de la paja de trigo es procesarla en combustibles como biogás o bioetanol, con un potencial de producción de 3.91 PJ y 4.04 PJ, respectivamente.

Key words: biomass, energy, renewable energy, wheat straw, agricultural burning

### ABSTRACT

Wheat is one of the most cultivated grains in the world because of its relevance for human consumption. Wheat is among the main crops in Mexico. In 2010, the wheat surface in Mexico was around 700 585 ha, with a yield of 3 676 707 t. In the same year, the wheat crop in Baja California represented 14.4 % of the national wheat

surface and 43.4 % of the state agricultural area, with 101 161 ha, of which 89 152 ha correspond to the municipality of Mexicali. Around 15 % of wheat straw generation is used for different applications and the remaining 85 %, approximately 553 188 t, are burned in situ. This considerable quantity of residual biomass is attractive, from the energy point of view, because of its high availability and energy content. Therefore, the present work shows the results of an evaluation of the transformation processes of 9.57 PJ recoverable from wheat straw. Such energy could be used by combustion for electricity generation, representing 13.98 % of the installed capacity of the geothermal park, Cerro Prieto (720 MW), located in the valley of Mexicali and 10.6 times the installed capacity of the wind farm La Rumorosa (10 MW), located in the town of Tecate. Another alternative of wheat straw processing is to convert it into fuels such as biogas or bioethanol, with a potential production of 3.91 and 4.04 PJ, respectively

## INTRODUCCIÓN

Mexicali es la ciudad capital del estado de Baja California, colinda al norte con Estados Unidos de América; al este con el estado de Sonora y el Golfo de California; al sur con el municipio de Ensenada y al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate (INFDM 2005). Entre sus principales actividades económicas destaca la agricultura con gran relevancia. La zona agrícola del Municipio de Mexicali se denomina Valle de Mexicali (VM), se encuentra ubicada en la región este y parcialmente dentro del delta del río Colorado. Esta zona agrícola, forma parte de una unidad geográfica compartida con el Valle Imperial del vecino estado de California, Estados Unidos de América, separados artificialmente por la división política entre ambos países (Moreno y López 2005).

El trigo es el principal cultivo en el Valle de Mexicali de acuerdo con lo reportado en 2010, con una superficie cultivada de 89 152 ha (SFA 2011). El trigo en el VM es utilizado comúnmente para la obtención de grano con diversas aplicaciones y como forraje para el ganado, previo al espigamiento donde es aprovechado en su totalidad. El rendimiento promedio del trigo cosechado en el VM es de 6.3 ton/ha, destacándose su calidad reconocida nacionalmente como una de las más sanas del país, libre de enfermedades. El cultivo de trigo se realiza en el periodo denominado otoño-invierno y la siembra se efectúa en diciembre y a principios de enero. La madurez fisiológica del trigo llega a los 125 días después de su siembra y la cosecha tiene una duración aproximada de 2 a 3 semanas (INIFAP 2008).

El 85 % de la paja de trigo que se genera en cada cosecha, es quemado in situ a cielo abierto (Moncada y Quintero 2008). La quema de los residuos del cultivo de trigo, es una práctica común que utilizan los agricultores del VM para disponer de tales residuos,

puesto que reduce los costos en la preparación de la tierra para el próximo ciclo agrícola y además evita la propagación de plagas y enfermedades en futuros cultivos.

Además del desaprovechamiento energético que implican las quemas agrícolas, éstas tienen asociadas emisiones considerables que deterioran el ambiente. Por ello, el objetivo de este trabajo consistió en estimar la energía liberada por la combustión de la paja de trigo en el Valle de Mexicali. Asimismo, evaluar otros procesos de transformación para el aprovechamiento de este residuo, tales como la obtención de biogás y de bioetanol. Estos biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas por seres vivos, a las cuales se les denomina biomasa y en el caso de los residuos agrícolas y forestales están compuestos principalmente por celulosa. La fase en la que se encuentran puede ser líquida, sólida o gaseosa, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión (Álvarez 2009).

Desde el punto de vista técnico y dependiendo de sus características, es factible convertir los residuos agrícolas en biogás o bioetanol a través de procesos físicos, termoquímicos o bioquímicos; su porcentaje de humedad y su contenido de celulosa y lignina, en cada caso, determinan el proceso más conveniente (Secretaría de Energía Argentina 2008).

Una alternativa a los biocombustibles es el aprovechamiento de la energía contenida en la paja de trigo que puede ser empleada (previo tratamiento físico como el peletizado) en una planta de ciclo combinado para la generación de electricidad. La eficiencia reportada en la literatura de este tipo de procesos, varía de 30 a 34 % para equipos que utilizan residuos de madera como combustible en plantas de potencia (IEA 2007).

La ventaja principal en la producción de biocombustibles a partir de residuos, es que no se desplazan tierras de cultivo destinadas a la producción de alimentos. Sin embargo, aunque se aprovecharía la energía química contenida en estos residuos, su combustión generaría inevitablemente emisiones de gases de efecto invernadero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describen los procedimientos efectuados para cuantificar la energía a partir de la paja de trigo, de los biocombustibles derivados y su equivalencia en barriles de petróleo. Para ello, se requirió información concerniente a la disponibilidad del recurso biomásico. Se consultó el sistema de información estadística de los cultivos agrícolas, disponible en la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS), denominado Anuario Estadístico de la producción Agrícola (SFA 2011), en relación con el sistema producto trigo, para obtener información de la superficie cultivada.

### Disponibilidad de biomasa y contenido de energía

Los cálculos del presente trabajo se basan en la totalidad de la biomasa que se quema a cielo abierto, que es del orden del 85 % de la paja de trigo generada (Moncada y Quintero 2008). Aunque se cultivan distintas variedades en el VM, se aplicó un índice de generación promedio de 7.3 ton/ha (SENER 2009). La paja de trigo según McKendry (2002) reporta un poder calorífico inferior (PCI) de 17.3 MJ/kg, valor que se consideró en este presente trabajo, para el desarrollo de los cálculos energéticos.

Enseguida, para determinar la disponibilidad de energía contenida en la paja de trigo, se relacionaron la superficie agrícola cultivada de trigo, cuya disposición es la quema a cielo abierto, con el índice de generación de paja y el PCI. Una vez obtenidos los resultados de la disponibilidad de energía, se estimó la equivalencia energética expresada en barriles de petróleo.

### Potencial de generación de energía eléctrica

La energía de la biomasa que se genera al final de cada ciclo agrícola podría ser aprovechada para su transformación en energía eléctrica mediante una planta de potencia. Para determinar la cantidad de energía eléctrica, la biomasa generada se multiplica por la eficiencia de transformación de energía, la cual se definió con un valor del 30 % y se divide entre el tiempo de operación, establecido en 11 meses.

### Transformación de la biomasa en bioetanol y biogás

Además de la posibilidad de obtener energía calorífica mediante la combustión directa de la biomasa residual del trigo, existe la posibilidad de extraer otras formas de combustibles mediante tratamiento bioquímico, esto es:

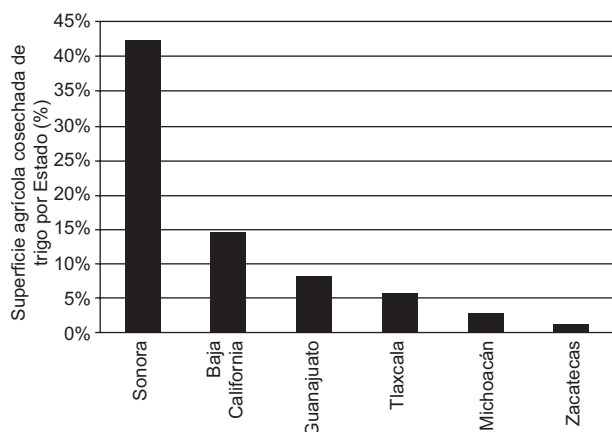
*Bioetanol.* También denominado bioetanol celulósico, para obtenerlo se requiere separar mediante enzimas o tratamiento físico, la lignina de la celulosa y posteriormente hidrolizar las moléculas de celulosa para romperlas y obtener los carbohidratos que serán fermentados y convertidos en bioetanol, y mediante la destilación purificar el alcohol obtenido (Cuervo 2009). Sin embargo, este proceso requiere una serie de pretratamientos, lo que dificulta en cierta manera la fermentación, debido a que se tiene que esterilizar la materia para evitar la contaminación por microorganismos. Para este proceso se consideró un rendimiento de transformación de bioetanol de 0.270 t por tonelada de paja de trigo procesada, con un poder calorífico de 26.8 MJ/kg (SENER 2009).

*Biogás.* El mecanismo predominante para la conversión de la biomasa en biogás es la conversión bioquímica o digestión de biomasa orgánica, que debe entenderse como un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos y enzimáticos simultáneamente. El método más común de producción de biogás es la digestión anaeróbica en un tanque cerrado llamado biodigestor. El biogás obtenido en esta transformación lo constituye una mezcla de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y de las condiciones de operación de los reactores donde ocurre la transformación (Vinasco 2009). El rendimiento de transformación para la obtención de biogás es de 0.29 t por tonelada de paja de trigo, y el poder calorífico promedio es de 23.8 MJ/kg (Donald 1998), considerando una relación 60 % metano y 40 % anhídrido carbónico.

Para determinar la energía contenida en el bioetanol y biogás, se multiplicó la disponibilidad de biomasa, por el rendimiento de transformación y poder calorífico promedio de cada biocombustible, con lo cual se obtuvo la energía total, que fue expresada en barriles de petróleo.

## RESULTADOS

Los resultados destacan la participación del cultivo de trigo a nivel nacional para el año 2010, en el



**Fig. 1.** Distribución de los estados de México con mayor superficie cosechada de trigo

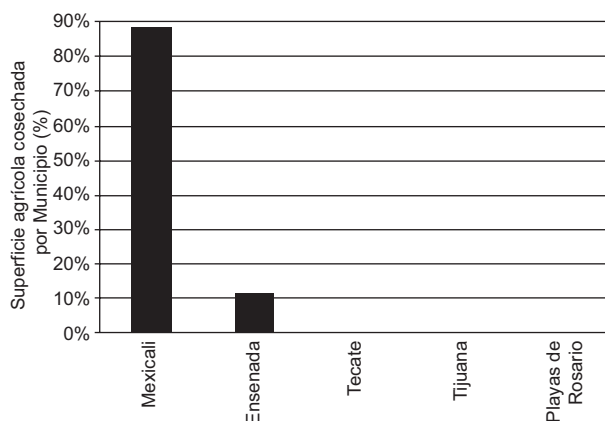
que se cosechó una superficie de 700 585 ha lo que representa el 3.2 % de la superficie agrícola total. Para ese mismo año, Baja California, se ubicó en el segundo lugar de los estados de México con mayor superficie de trigo cultivada, con el 14.4 %, precedido por el estado de Sonora, como se puede apreciar en la **figura 1**.

Para el ciclo agrícola 2010, el VM fue el principal productor de trigo en el estado de Baja California, con 89 152 ha cultivadas, seguido por el municipio de Ensenada con 11 986 ha, según se aprecia en la **figura 2**. El municipio de Tecate cuenta con superficies cultivadas de trigo poco significativas, y en los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito, el cultivo de trigo es nulo.

Con base en la superficie cultivada de trigo en el VM de 89 152 ha, se obtuvo una estimación de 553 188 t de paja de trigo, disponible para su transformación en diversas formas de biocombustibles. Esta información constituye el punto de partida para determinar la disponibilidad de las diferentes formas de biocombustibles, junto con los datos referentes a los tratamientos específicos a los que es posible someter la paja de trigo y obtener el producto deseado.

#### Potencial energético de la paja de trigo

A partir de la disponibilidad de paja de trigo, así como de las características de rendimiento antes



**Fig. 2.** Superficie sembrada (ha) de trigo por municipio en Baja California

citadas, se obtuvo la cantidad de energía por tipo de proceso, los cuales se muestran en el **cuadro I**.

La paja de trigo podría ser utilizada como combustible en una planta de potencia nominal de 100 MW de capacidad instalada, que operase 11 meses al año.

## DISCUSIÓN

La energía contenida en la biomasa que se genera al final de cada ciclo agrícola es de 9.57 PJ, lo que equivale a 1 499 789.24 barriles de petróleo. La disponibilidad de transformación de la paja de trigo en biogás es del orden de 3.91 PJ equivalente a 632 433.73 barriles de petróleo; mientras que para el bioetanol es de 4.04 PJ que equivale a 612 591.95 barriles de petróleo. Existe una clara disminución de la cantidad de energía equivalente en forma de biogás y bioetanol en relación con la contenida en la biomasa residual de trigo, esto se atribuye a las pérdidas energéticas de los procesos de conversión de la biomasa.

La electricidad que potencialmente podría generarse a partir de la biomasa residual de la cosecha del trigo representa el 13.98 % de la capacidad instalada de generación de energía eléctrica del parque geotérmico Cerro Prieto (720 MW), ubicado en el Valle de Mexicali y 10.6 veces la capacidad instalada del

**CUADRO I.** DISPONIBILIDAD DE FORMAS DE ENERGÍA PARTIR DE LA PAJA DE TRIGO

Proceso de conversión	Producto	Relación de rendimiento de biocombustible	kg de biocombustible/t de paja de trigo	PCI MJ/kg	Energía disponible PJ	Barriles equivalentes de petróleo
Tratamiento físico	Biomasa	1:1	1000.00	17.3	9.57	1 499 789.24
Fermentación alcohólica	Bioetanol	1:0.27	272.21	26.8	4.04	632 433.73
Biodigestión anaerobia	Biometano	1:0.29	296.90	23.8	3.91	612 591.95

parque eólico La Rumorosa (10 MW), localizado en el municipio de Tecate.

En la actualidad, esta cantidad de energía es liberada al ambiente sin provecho alguno, después de cada ciclo agrícola, generando además problemas de contaminación por la combustión de los residuos del cultivo de trigo, por lo que es urgente implementar proyectos mediante los cuales se aproveche esta biomasa, ya sea para ser transformada o utilizada directamente para su combustión. Es así, que este trabajo permitió detectar un área de oportunidad para disponer de un residuo y al mismo tiempo aprovechar su contenido de energía.

Para efectuar las estimaciones reportadas en este trabajo, se tomó de revistas científicas un PCI representativo para las distintas variedades que actualmente se cultivan en el VM, lo cual constituye una limitante de los resultados presentados.

## CONCLUSIÓN

La paja de trigo generada en el VM resulta atractiva, desde el punto de vista energético, por los grandes volúmenes disponibles y el elevado contenido energético de este material.

La bioenergía y las tecnologías que hacen posible su aprovechamiento tienen un gran potencial para satisfacer las necesidades energéticas de los seres humanos y para contribuir a la sustitución de las fuentes energéticas fósiles y nucleares. Sin embargo, requiere que su explotación se haga en términos sustentables para que se aproveche mejor su carácter regenerativo, lo cual la convertiría en una fuente renovable. Es necesario que su desarrollo se realice conciliando los conflictos de uso del suelo y de la producción de alimentos, propiciando el desarrollo y la equidad social.

Todas las opciones analizadas de utilización de la biomasa residual de trigo como biocombustible, tienen en común que no compiten con alimentos, lo que significa que pueden ser clasificadas como procesos de biocombustibles de segunda generación.

La implementación de este tipo de proyectos de producción de energía coadyuvaría en la diversificación de energéticos en Baja California, asegurando de forma parcial el suministro de energía eléctrica y energía primaria y con ello la disminución de la dependencia hacia los combustibles derivados del petróleo. Desde el punto de vista económico se apoyaría el desarrollo del campo debido a que se le daría un valor agregado a un material que se considera residuo.

Una de las limitantes del uso de la biomasa residual en la generación eléctrica o para su conversión en bioetanol o biodiésel, es la ubicación de la planta de procesamiento de la paja de trigo, la cual se aconseja instalar lo más cercano a la fuente de generación de la materia prima, para evitar gastos de transporte.

El presente trabajo sienta las bases para evaluar las diferentes opciones de transformación de la biomasa residual del cultivo de trigo del Valle de Mexicali, en bioenergía.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONACyT y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Álvarez C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa* 359, 63-89.
- Cuervo L., Folch J. L., Quiroz R. E. (2009). Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. *BioTecnología*, 13, 11-25.
- Donald L. (1998). Biomass for renewable energy, fuels and chemicals. Academic Press. San Diego California. 609 pp.
- IEA (2007). Biomass for power generation and CPH. International Energy Agency. <http://www.iea.org/techno/essentials3.pdf> [en línea] 03/04/2011.
- INIFAP (2008). Estudio estadístico-documental sobre variedades, grupos y calidad de trigo del Valle de Mexicali. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. [http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus\\_bca/biblioteca/Estudios/Agricolas/variedadesTrigo.pdf](http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/biblioteca/Estudios/Agricolas/variedadesTrigo.pdf) [en línea] 02/05/2011.
- INFDM, Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2005). Gobierno del Estado de Baja California. Enciclopedia de los municipios de México, Estado de Baja California, Mexicali. <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/bajacalifornia/municipios/02002a.htm> [en línea] 02/05/2011.
- McKendry P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technol.* 83, 37-46.
- Moncada A. y Quintero M. (2008). Contaminación y control de las quemadas agrícolas en Imperial, California y Mexicali, Baja California. *Región y Sociedad* XX, 3-24.

- Moreno M. y López M. (2005). Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el Valle de Mexicali. *Estudios Fronterizos*, 6, 119-153.
- Secretaría de Energía Argentina. (2008). *Energías Renovables 2008*. [http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf) [en línea] 02/08/2011.
- SENER (2009). *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el transporte en México*. Secretaría de Energía. [http://www.sener.gob.mx/res/169/Biocombustibles\\_en\\_Mexico\\_Estudio\\_Completo.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf) [en línea] 05/04/2011.
- SFA. (2011). *Anuario Estadístico de la producción Agrícola para el Estado de Baja California*. Secretaría de Fomento Agropecuario. [www.sfa.gob.mx](http://www.sfa.gob.mx) [en línea] 05/08/2008.
- Vinasco S. (2009). *Tecnología del biogás*. [www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf) [en línea] 05/08/09.