

EMISIONES DE LAS QUEMAS DE PAJA DE TRIGO EN EL VALLE DE MEXICALI, 1987-2010

Marcos Alberto CORONADO ORTEGA¹, Gisela MONTERO ALPÍREZ^{1*},
Conrado GARCÍA GONZÁLEZ^{1,2}, Armando PÉREZ SÁNCHEZ¹ y Laura Janet PÉREZ PELAYO¹

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

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

*Autor responsable; gmontero@uabc.edu.mx

(Recibido agosto 2011, aceptado enero 2012)

Palabras clave: biomasa, contaminación atmosférica, energía, simulación dinámica

RESUMEN

Baja California, México, se ubica en tercer lugar a nivel nacional con mayor superficie de trigo cultivada (13.5 %). Mexicali, capital de dicho estado, es el principal productor de trigo y representa el cultivo más importante de su valle, con una superficie cultivada en el periodo 2009-2010 de 87 724 ha. Esto conlleva a la generación de grandes cantidades de paja de trigo como residuo agrícola. Tradicionalmente el 85 % de este residuo es dispuesto mediante la quema *in situ* a cielo abierto con el objetivo de preparar la tierra para el próximo ciclo agrícola, el 15 % restante tiene diversas aplicaciones. Tal práctica repercute considerablemente en las emisiones de CO, material particulado (MP) y CH₄ al ambiente, ocasionando un deterioro de la calidad del aire del Valle y ciudad de Mexicali, así como problemas en la salud de la población. Por otra parte, se desaprovecha la energía contenida en la paja de trigo, que es potencialmente útil como biocombustible y que en el año 2010 fue de 6.8 PJ. Se presenta un inventario de las emisiones generadas por las quemaduras de la paja de trigo realizadas *in situ* a cielo abierto, para el periodo 1987-2010. En los resultados destaca que las emisiones totales, considerando las quemaduras agrícolas progresivas en dirección del viento, pasaron de 25 370 t (1987) a 41 913 t (2010). Considerando las enormes cantidades tanto de energía desaprovechada, como de las emisiones provocadas por las quemaduras de paja, es recomendable evaluar la factibilidad técnica y económica para reconvertir tal biomasa residual y utilizarla como materia prima para la obtención de biocombustibles o directamente en procesos de generación eléctrica.

Key words: biomass, atmospheric pollution, energy, dynamic simulation

ABSTRACT

The state of Baja California, Mexico, ranks third nationally, with the largest area of wheat cultivation (13.5 %). Mexicali, BC capital is the main wheat producer and it represents the most important crop in the valley, with 87 724 ha as cultivated surface for the period 2009-2010; this leads to the generation of large amounts of wheat straw as agricultural residue. Traditionally 85 % wheat straw is burned *in situ* in order to

prepare the farmland for the next agricultural cycle. The remaining 15 % have various applications. This practice has a considerable impact on CO, particulate matter and CH₄ emissions to environment, causing deterioration in air quality of Mexicali city and Valley, as well as problems in population health. In addition, the wheat straw energy content is wasted, which is potentially useful as a biofuel and it was estimated at 6.8 PJ in 2010. In this research, it is presented an emissions inventory by wheat straw *in situ* burning, for the period 1987-2010. The results show that total emissions, considering a head fire burning increased from 25 370 t (1987) to 41 913 t (2010). Considering the enormous amounts of wasted energy and emissions from wheat straw burning, it is advisable to evaluate the technical and economic feasibility to reconvert waste biomass and use it as feedstock for biofuels production or directly into power generation process.

INTRODUCCIÓN

La quema de biomasa es considerada como una fuente global y significativa de emisiones, contribuyendo con aproximadamente 40 % de CO₂. El 90 % de las quemas son iniciadas por el ser humano. Estas quemas inducidas son utilizadas con una diversidad de finalidades, como son deforestación, control de plagas, quemas de maleza y residuos, así como prácticas poscosecha. Se ha estimado que 8700 Tg de materia seca es quemada en el mundo cada año y representa uno de los factores más importantes que afectan el cambio climático (Koppmann *et al.* 2005). Los sistemas agrícolas en todo el planeta producen grandes cantidades de residuos. La quema de los residuos en el campo es una práctica común, sobre todo en los países en desarrollo. Tal es el caso de México, donde el sector agrícola se ubica como una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (SEMARNAT e INE 2006).

Una de las zonas agrícolas más importante del noroeste del país, es el Valle de Mexicali. Este valle se encuentra ubicado en el estado de Baja California, al noroeste de México y comparte la misma cuenca atmosférica con el Valle Imperial, EUA. Su cultivo principal es el trigo, y es conocido como el de mayor rendimiento comercial en el país, con una productividad media en los últimos años de 6.3 t/ha. Dicho Valle, está posicionado a nivel nacional, como uno de los que cuenta con mayor superficie de trigo cultivada. Si bien las condiciones climáticas han sido favorables para este cultivo en la región, el uso de variedades mejoradas de alto potencial productivo y la experiencia del productor en la aplicación de los paquetes tecnológicos para su manejo han sido determinantes para lograr este nivel de producción (SAGARPA 2011a). La cosecha de trigo tiene asociada la generación de grandes cantidades de paja como residuo agrícola. Tradicionalmente 85 % de este residuo es dispuesto mediante la quema *in situ* a

cielo abierto con el objetivo de preparar los campos para dobles cultivos o para el siguiente ciclo agrícola, el 15 % restante tiene diversas aplicaciones (Quintero y Moncada 2008).

Los productores de trigo del Valle de Mexicali que llevan a cabo estas prácticas, señalan que la quema constituye una práctica tradicional, mientras que otros consideran que la incineración de residuos agrícolas es una necesidad, ya que se elimina maleza perenne, enfermedades y plagas. Sin embargo, se ha demostrado que contrario a las creencias de los productores, la quema calcina el nitrógeno, fósforo y materia orgánica del suelo, además de generar costos adicionales y disminución de rendimientos y por ende mermas en la utilidad al obtener menos volúmenes por hectárea de trigo entre ciclo y ciclo (SFA 2010). Otros señalan que al quemar la paja de trigo, se evita el paso de maquinaria, se ahorra tiempo para la preparación del suelo para el siguiente ciclo y dinero en maquinaria, diesel y mano de obra del tractorista. Tal práctica repercute considerablemente en las emisiones de CO, MP y CH₄ al ambiente, ocasionando un deterioro de la calidad del aire del Valle y de la ciudad de Mexicali así como problemas en la salud pública, como son enfermedades respiratorias. Cabe destacar que Mexicali es una de las ciudades con mayor incidencia de morbilidad por infecciones respiratorias agudas del país. Por otra parte, la quema de la paja de trigo representa un desaprovechamiento de la energía contenida en la misma, la cual es potencialmente útil como biocombustible en la generación de electricidad y energía calorífica, así como en el transporte, una vez que es transformado en bioetanol (McKendry 2002). De esta manera se contribuiría a diversificar la matriz energética regional, incrementando la participación de fuentes renovables.

En 1996, se estimaron 14 325 t y 2143 t de emisiones de CO y MP respectivamente, provenientes de las quemas agrícolas (INE 1996), mientras que para 2003 y 2004, fueron de 13 870.5 t y 1 667.8 t

respectivamente (Quintero y Moncada 2008). Actualmente no existen estimaciones para años anteriores y posteriores a los mencionados. Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo la estimación de las emisiones asociadas a las quemadas *in situ* a cielo abierto de la paja de trigo generada en el Valle de Mexicali, para el periodo histórico 1987-2010.

MATERIALES Y MÉTODOS

Paja de trigo

En la realización de evaluaciones de recursos biomásicos residuales, se requiere información relacionada con la disponibilidad del recurso original del cual provienen. Es por ello, que se consultaron las bases de datos de la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS) de Baja California, en relación al sistema producto trigo, con el fin de obtener la serie histórica de superficie cosechada de trigo en el Valle de Mexicali para el periodo bajo estudio que se ilustra en el **cuadro I** (SAGARPA 2011b).

La paja de trigo es un remanente que se genera

CUADRO I. SERIE HISTÓRICA DE LA SUPERFICIE COSECHADA DE TRIGO, 1987-2010

Periodo	Superficie cosechada de trigo [ha]	Periodo	Superficie cosechada de trigo [ha]
1987-88	53 098	1999-00	74 273
1988-89	50 572	2000-01	68 033
1989-90	48 374	2001-02	64 926
1990-91	60 366	2002-03	74 394
1991-92	79 683	2003-04	85 320
1992-93	79 683	2004-05	80 555
1993-94	80 018	2005-06	75 989
1994-95	69 658	2006-07	79 946
1995-96	53 159	2007-08	81 958
1996-97	67 224	2008-09	88 937
1997-98	54 913	2009-10	87 724
1998-99	50 636		

en grandes cantidades durante la cosecha del trigo. Es un material lignocelulósico cuya composición (% en peso) es aproximadamente 53.5 % celulosa, 21 % lignina, 15 % agua y 10.5 % cenizas. Para realizar la estimación de la cantidad de paja de trigo generada para cada ciclo agrícola, se consideró un índice de generación de 7.3 t/ha (SENER *et al.* 2006). Todo recurso biomásico tiene asociado un contenido energético. La energía disponible de la biomasa está expresada de 2 formas: a) Poder calorífico superior (PCS) y b) Poder calorífico inferior (PCI).

Para el petróleo, por ejemplo, la diferencia entre estos dos parámetros, en raras ocasiones es mayor al 10 %, mientras que para la biomasa que presenta gran variabilidad en cuanto al contenido de humedad, la diferencia puede ser mayor. El PCS se refiere a la energía total que puede ser liberada en el proceso de combustión dividida entre la masa del combustible. Es ampliamente utilizado en muchos países. El PCI se refiere a la energía disponible a partir de la combustión después de las pérdidas energéticas como consecuencia de la evaporación del agua. El PCI siempre es menor que el PCS, principalmente por el hecho de que no incluye dos formas de energía térmica liberada durante la combustión: a) la energía para evaporar el agua contenida en el combustible, y b) la energía para formar agua a partir del hidrógeno contenido en las moléculas de hidrocarburos y evaporarla (Rosillo-Calle *et al.* 2009). Por lo tanto, al momento de realizar estudios o evaluaciones de potencial energético, se considera el PCI.

En el caso de la paja de trigo, McKendry (2002) reporta un PCI de 17.5 MJ/kg; para el cálculo de la energía total que se libera a partir de su combustión, se consideró un poder calorífico de 12.5 MJ/kg, debido a que la paja de trigo generada en el Valle de Mexicali no ha sido caracterizada.

Factores de emisión

Para la estimación de las emisiones de CO, MP y CH₄ asociadas a las quemadas de la paja de trigo *in situ* a cielo abierto, se adoptaron los factores de emisión reportados por EPA AP-42 (1995) que se muestran en el **cuadro II**. Dentro del reporte de la EPA destacan dos series de factores que dependen del tipo de técnica de quema agrícola que se implemente:

- Quema frontal. Técnica de quema en la cual el fuego avanza en la dirección del viento.
- Quema en contracandela. Técnica de quema en la cual el fuego progresa en dirección opuesta al viento.

Debido a incertidumbre existente acerca de la técnica de quema que se utiliza en mayor proporción en el Valle de Mexicali, se realizaron los cálculos considerando ambas.

CUADRO II. FACTORES DE EMISIÓN DE LA QUEMA DE PAJA DE TRIGO A CIELO ABIERTO

Tipo de quema	Factores de emisión [kg/t]		
	CO	CH ₄	MP
Quema frontal	64	2	11
Quema en contracandela	54	1.3	6

Modelo de simulación

Las emisiones asociadas a las quemas agrícolas dependen de una gran cantidad de parámetros, por ello, se seleccionaron aquéllos que estaban respaldados con información actual y confiable. Los parámetros utilizados para alimentar el modelo fueron los siguientes: a) serie histórica de la superficie cosechada de trigo b) índice de generación de paja de trigo, c) poder calorífico inferior de la paja de trigo, d) factores de emisión de CO, CH₄ y MP, para técnicas de quema agrícola, e) factor de eficiencia de generación eléctrica a partir de biomasa y fracción de biomasa considerada para su combustión. La secuencia y relación entre ellos se ilustra en la **figura 1**.

Con base en los parámetros seleccionados y con la finalidad de facilitar el análisis de las emisiones asociadas a las quemas de paja de trigo durante el periodo 1987-2010, se desarrolló un modelo dinámico en Stella[®], cuya versión simplificada se ilustra en la **figura 2**.

El desarrollo del modelo en Stella, permite establecer y observar de manera gráfica y práctica, las interrelaciones de las distintas variables utilizadas para estimar las emisiones correspondientes a la quema de la paja de trigo y la cantidad de energía generada durante la combustión de los residuos agrícola bajo estudio y las emisiones asociadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emisiones asociadas a la quema de paja de trigo

Los resultados indican que las emisiones totales (CH₄, CO y MP) se habrían incrementado de 25 370 t (1987) a 41 913 t (2010) considerando el tipo de

quema frontal, mientras que para la quema en contracandela las emisiones habrían aumentado de 20 197 t (1987) a 33 367 t (2010). Ambos casos representan un incremento del 60.5 %.

Las **figuras 3 y 4** muestran las emisiones acumuladas para el periodo bajo estudio. En el caso de la quema frontal, el CO destaca en el primer lugar con 639 140 t, enseguida el MP con 109 852 t, y por último el CH₄ con 19 973 t. En la quema en contracandela las emisiones de CO, PM y CH₄ son 539 274 t, 59 919 t y 12,982 t, respectivamente.

La quema en contracandela evidencia una disminución en emisiones en comparación con la quema frontal, debido a que ésta progresa en dirección opuesta al viento, propiciándose una mayor interacción con el oxígeno. Esto favorece que los residuos ardan más lentamente y la combustión de la paja sea más completa.

Los resultados obtenidos a partir del modelo se ajustan con bastante aproximación a los calculados, con un error porcentual del 1.07 %. En la **figura 5** se expone el comparativo de emisiones acumuladas entre las calculadas y las obtenidas del modelo, considerando ambas técnicas de quema.

Energía disponible de la paja de trigo

La energía total disponible a partir de la combustión de la paja de trigo periodo 1987-2010 se estimó en 124.8 PJ lo que equivale aproximadamente a 19.5 millones de barriles de petróleo, esto representa el 1.27 % de la producción de energía primaria nacional del año 2009 (SENER 2009). La energía disponible de la paja de trigo que es incinerada, varía año con año, sin embargo, la tendencia mostrada en la **figura 6**, indica que va en incremento desde los 4 PJ en 1987, hasta los aproximadamente 7 PJ en 2010.

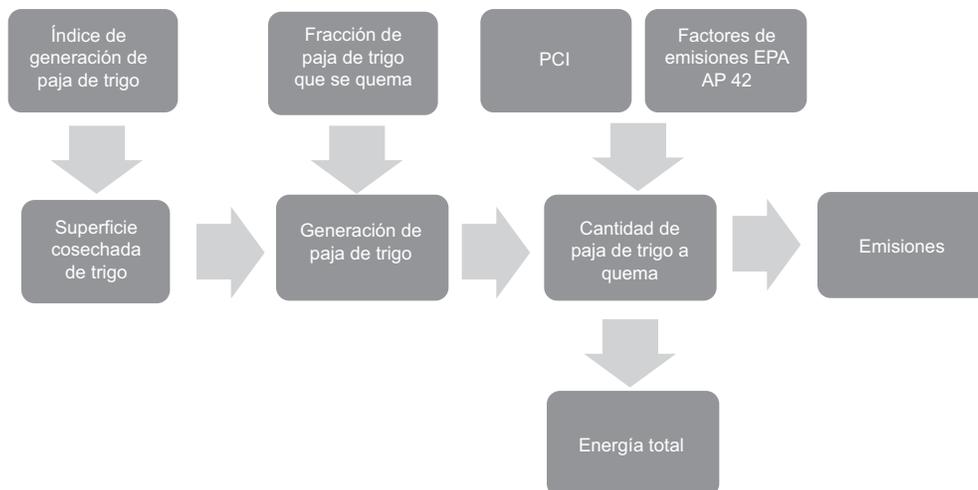


Fig. 1. Parámetros utilizados en el modelo de generación de emisiones

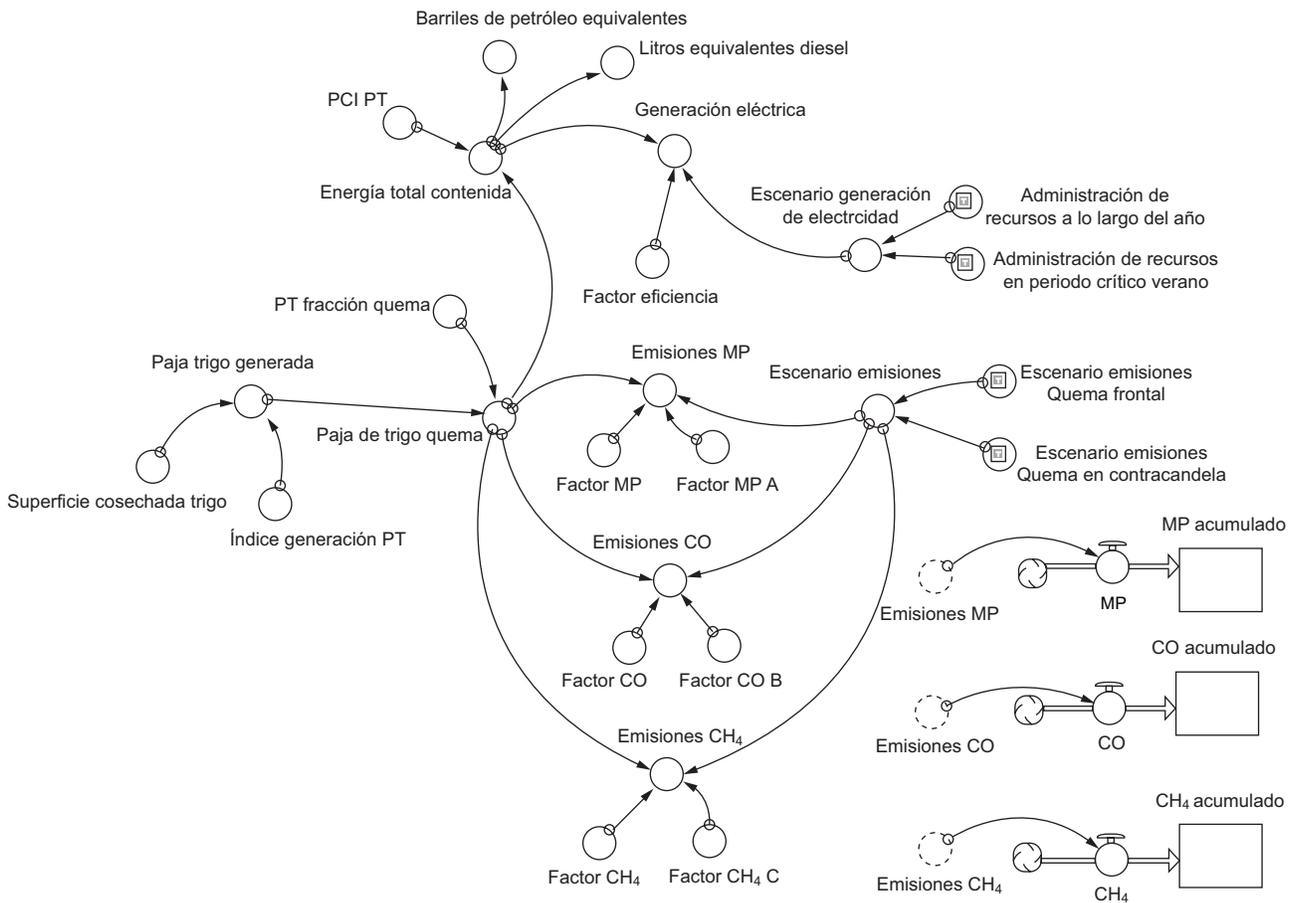


Fig. 2. Modelo para análisis de emisiones

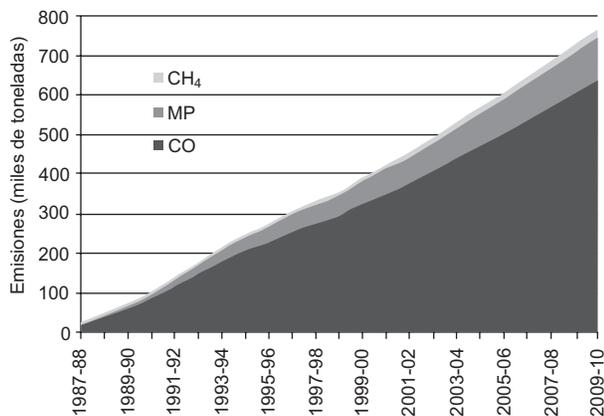


Fig. 3. Emisiones acumuladas, quema frontal

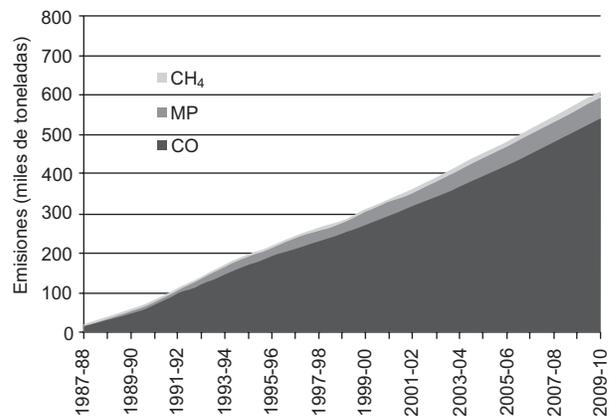


Fig. 4. Emisiones acumuladas, quema en contracandela

El promedio anual de energía disponible estimada fue de 5.43 PJ, magnitud energética que representa el 1.55 % de la energía proveniente de la biomasa en México (SENER 2009). Sin embargo, su utilización plantea una serie de retos y oportunidades que deben tenerse en cuenta. Para ello, es necesario llevar a cabo evaluaciones integrales de factibilidad técnica

y económica, con la finalidad de determinar cuál es el proceso más adecuado para la conversión de energía de la paja de trigo. Si se considera su procesamiento para obtener biocombustibles, es posible obtenerlos en alguno o algunos de los siguientes estados físicos:
 a) Líquido (bioetanol). Para llevar a cabo la transformación del material lignocelulósico (paja

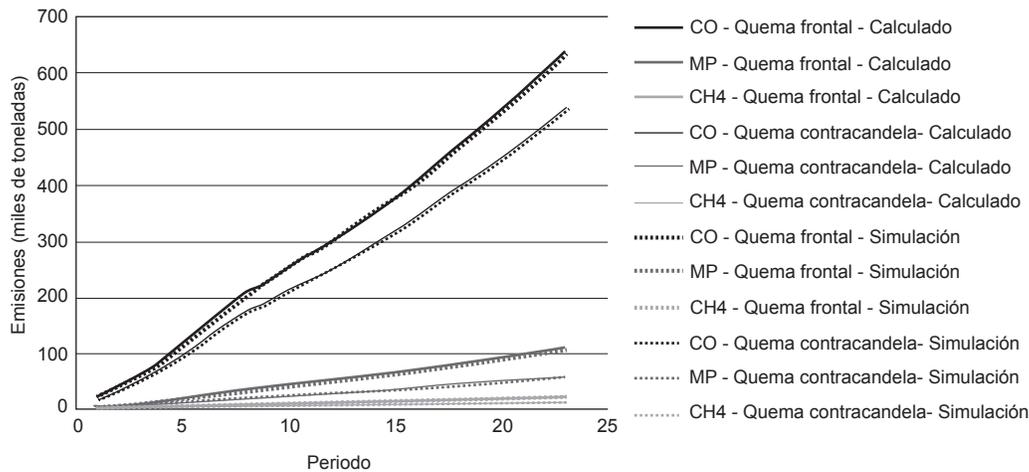


Fig. 5. Comparativo de resultados estimados y simulados

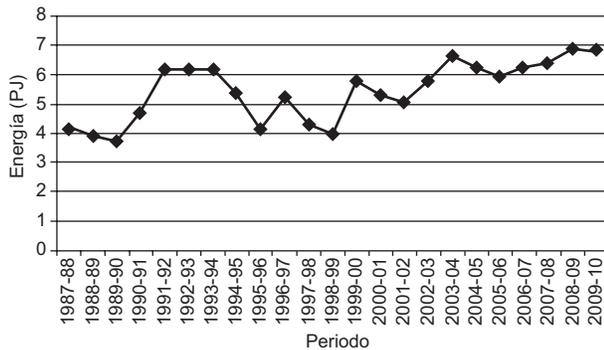


Fig. 6. Energía disponible de la paja de trigo

de trigo) a bioetanol se requiere de un proceso bioquímico. Es necesario un pretratamiento con un ácido fuerte para separar la fracción de lignina de la celulosa y que esta sea más accesible para la sacarificación subsiguiente, mejorando la digestibilidad enzimática. Las enzimas celulasas son introducidas para hidrolizar los carbohidratos y obtener una gran variedad de azúcares que son fermentados para producir etanol. La porción de lignina generalmente no reacciona y puede ser recuperada y utilizada como combustible o materia prima en procesos de conversión termoquímicos (Kaparaju *et al.* 2009, Kent 2009).

- b) Gaseoso. La conversión de material lignocelulósico a un combustible en estado gaseoso puede efectuarse mediante procesos termoquímicos o bioquímicos. En el caso de un proceso termoquímico de gasificación, se realiza una descomposición del material lignocelulósico a alta temperatura, seguido de una oxidación parcial para producir gas

de síntesis compuesto principalmente por CO y H₂ (Kent 2009). Por otra parte, el proceso de conversión bioquímico o digestión de biomasa orgánica es un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos y enzimáticos simultáneamente. El método más común de producción de biogás es la digestión anaerobia en un tanque cerrado denominado biodigestor. El biogás obtenido es una mezcla de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción, así como de las condiciones de operación de los reactores donde ocurre la transformación (Silva 2002).

- c) Sólido. Uso directo como combustible en una planta de ciclo combinado de generación eléctrica.

Asimismo, se debe considerar y estimar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para cada proceso y compararla con las emisiones asociadas por la quema de combustibles fósiles y los costos de tratamiento de tales emisiones, teniendo en cuenta el efecto de los GEI sobre el cambio climático. De esta manera, se agregarían beneficios a un proyecto de reconversión de residuos. La reutilización de la biomasa residual con fines de producción de energía coadyuvaría en la diversificación de energéticos de Baja California, aseguramiento del suministro energético, y disminución de la dependencia hacia los combustibles convencionales. Desde el punto de vista económico, apoyaría en la reactivación del crecimiento y desarrollo del campo y mayores fuentes laborales.

CONCLUSIONES

La agricultura es una actividad intensiva y de gran importancia para el desarrollo económico de la región. Asimismo, significa la generación de grandes cantidades de biomasa residual como la paja de trigo, que al ser dispuesta mediante la quema *in situ* a cielo abierto, emite año tras año cantidades considerables de CO, CH₄ y MP, contaminantes que afectan la calidad del aire de Mexicali y su valle. Es necesario implementar medidas para controlar y minimizar las quemas agrícolas y por ende reducir las emisiones asociadas. Por otra parte, existe un alto potencial biomásico que abre una gama de oportunidades para su aprovechamiento en procesos productivos como resultado de su contenido energético, que puede ir desde la generación de electricidad y energía térmica hasta la producción de bioetanol. Se estimó que la energía total disponible a partir de la combustión de la paja de trigo del periodo 1987-2010 es de 124.8 PJ lo que equivale aproximadamente a 19.5 millones de barriles de petróleo.

El desarrollo del presente trabajo permitió estimar las emisiones correspondientes como resultado de la quema de paja de trigo en el periodo bajo estudio, lo cual hace evidente la gravedad de dicha problemática y contribuye con información que justifica la necesidad de fomentar alternativas sustentables de disposición de residuos agrícolas con un menor impacto ambiental, entre los agricultores de la región. De acuerdo con el modelo de quema a contracandela, las emisiones totales (CH₄, CO y MP), para el periodo 1987-2010, se incrementaron de 20 197 toneladas a 33 367 toneladas, lo cual representa un incremento del 60.5 %.

El modelo puede adaptarse para efectuar proyecciones y establecer diferentes escenarios, por ejemplo: a) cambio de los hábitos y tradiciones en cuanto a la disposición de la paja de trigo y b) continuar con la misma dinámica actual de quema de residuos agrícolas como principal acción de disposición.

Por otra parte, este modelo puede utilizarse como base en la elaboración de futuras evaluaciones y estudios sistemáticos, para estimar la disponibilidad de biomasa residual que se genera en el estado de Baja California, así como su potencial energético, impacto ambiental e inventario de emisiones. Asimismo, serviría como una herramienta de toma de decisiones para inversionistas interesados en generar energía eléctrica utilizando la biomasa residual, en una región en donde se genera principalmente a partir del gas natural y de vapor geotérmico.

El desarrollo de una industria sustentable a partir de bioenergéticos residuales, requiere una cadena de suministro grande y compleja, que incluya: a) el aseguramiento del abastecimiento de la biomasa residual, b) logística en cuanto a la transportación (de preferencia su consumo deberá realizarse cercano a las fuentes de generación), c) métodos efectivos de separación de la biomasa residual y de preparación para su utilización dependiendo el proceso de conversión, d) desarrollo de biorrefinerías e industrias de transformación y e) sobre todo, el apoyo de los actores gubernamentales, iniciativa privada, académico e investigación y desarrollo, para impulsar y materializar proyectos de esta naturaleza.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece efusivamente a CONACyT y UABC, por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- EPA (1995). Compilation of air pollutant emission factors. Volume I, Chapter 2: Solid Waste Disposal, Open Burning. Environmental Protection Agency. EPA AP 42, 5a ed.
- Rosillo-Calle F., de Groot P. y Hemstock S.L. (2009). The biomass assessment handbook: bioenergy for a sustainable environment. Chapter 2: General Introduction to the Basis of Biomass Assessment Methodology. Earthscan, Reino Unido.
- INE (1996). Inventario de emisiones de Mexicali. Instituto Nacional de Ecología, México. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/236/cap5.html> [en línea] 02/05/2011.
- Kaparaju P., Serrano M., Thomsen A., Kongjan P. y Angelidaki I. (2009). Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. *Bioresour. Technol.* 100, 2562-2568.
- Kent S. (2009). Biofuels in the U.S. – Challenges and Opportunities. *Renewable Energy*, 34, 14-22.
- Koppmann R., Czapiewski K. y Reid J. (2005). A review of biomass burning emissions, part I: Gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 5, 10455-10516.
- McKendry P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresour. Technol.* 83, 37-46.

- Quintero M., Moncada A. (2008). Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California. *RyS XX*, 3-24.
- SAGARPA (2011a). Plan rector del sistema producto trigo, Baja California. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México. <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Publicaciones/SistemaProducto> [en línea] 03/05/2011.
- SAGARPA (2011b). Serie histórica de producción de trigo grano, sistema producto trigo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México. <http://www.oeidrus-bc.gob.mx/sispro/trigobc/> [en línea] 09/05/2011.
- SEMARNAT INE (2006). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. <http://books.google.com.mx/books?id=VyWfWhoHkBwC&lpg=PR16&pg=PR16#v=onepage&q&f=false>. México D.F. 258 p.
- SENER, BID, GTZ (2006). Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. Secretaría de Energía, Banco Interamericano de Desarrollo, Cooperación Técnica Alemana. http://www.sener.gob.mx/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf. México, D.F. 600 p.
- SENER (2009). Balance nacional de energía. Secretaría de Energía. http://www.sener.gob.mx/res/1791/Balance_Nacional_2009.pdf. México, D.F. 145 p.
- SFA (2010). Estudio sobre la utilización de la paja de trigo. http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/ [en línea] 09/05/2011.
- Silva V. (2002). Tecnología del biogás. Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf> [en línea] 21/11/11.