

Disponibilidad y costos de producción de biomasa forestal como materia prima para la producción de bioetanol

G. Perez-Verdin^{1,*}, J. J. Navar-Chaidez¹, D. L. Grebner² and C. E. Soto-Alvarez¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR – DGO, Sigma 119, Fracc. 20 de Noviembre II, 34220 Durango, Dgo., Mexico

² Mississippi State University, College of Forest Resources, Box 9681, Mississippi State, MS 39762, USA

Resumen

La biomasa forestal es una alternativa ecológica y económicamente viable para la generación de bioetanol debido a que su fuente es abundante, renovable y contribuye a la reducción de gases efecto invernadero. En este estudio, se propone y analiza una metodología para la estimación de la disponibilidad y costos de producción del uso potencial de la biomasa forestal como materia prima para la producción de bioetanol en bosques de pinos del estado de Durango, México. Se usó información del Inventario Forestal Periódico, programas de manejo forestal y datos de empresas de aserraderos e industriales forestales para estimar la biomasa forestal que incluye los restos de aprovechamientos forestales (puntas, ramas) y desperdicios industriales (aserrín, costeras). Se utilizaron simulaciones Monte Carlo para estimar costos de producción de la recolección, extracción y transporte de la biomasa a centros de transformación. Los resultados indican que alrededor de 322.000 toneladas pueden utilizarse para la producción de 38 millones de litros de etanol por año. Las simulaciones Monte Carlo indican que el costo promedio de residuos forestales es de US \$23,8 por tonelada (US \$0,20 L⁻¹ etanol) mientras que el de residuos industriales es de US \$22,6 por tonelada (US \$0,19 L⁻¹ etanol). Los factores más importantes en el análisis de sensibilidad fueron el costo pagado a dueños del material, eficiencia tecnológica y distancia de transporte. En el corto plazo, el uso de la biomasa forestal para la generación de biocombustibles tiene varios retos entre los que se encuentran los costos de transporte y la competencia generada por industrias similares como pulpa, papel y tableros aglomerados. Como alternativa se encuentra el desarrollo de biorefinerías integradoras y el uso de medios de transporte más eficientes.

Palabras clave: biocombustibles; costos de producción; Durango, México; residuos forestales; residuos industriales; simulaciones Monte Carlo.

Abstract

Availability and production costs of forest biomass as a feedstock for bioethanol production

Forest biomass is a viable alternative to produce ethanol because is abundant, clean, renewable, and can help mitigate greenhouse gas emissions. In this study, a methodology to estimate availability and production costs of forest biomass in forest pines of the state of Durango, Mexico is presented. Forest periodic inventory, forest management plans, and sawmill information were used to estimate forest residues and mill residues, respectively. Since a market for bioethanol from forest biomass is still not well defined, Monte Carlo simulations were conducted to estimate procurement, transportation, and stumpage costs. Results show that about 322,000 tons can be used to produce up to 38 million of liters of ethanol per year. Of that amount, 66% is forest residues and the rest mill residues. Monte Carlo simulations indicated that the average cost of forest residues is US \$23.8 per metric ton (US \$0.20 L⁻¹ ethanol) while the cost for mill residues is US \$22.6 per metric ton (US \$0.19 L⁻¹ ethanol). The more important factors in the sensitivity analysis were stumpage costs, technological efficiency, and transportation. The study concluded that in the short term bioethanol development have to compete with products that use similar raw material such as the pulp, paper and wood-based panels industries and reduce transportation costs. Alternatively, it is recommended the development of integrated biorefineries and the use of more efficient transportation means.

Key words: biofuels; Durango, Mexico; forest residues; mill residues; Monte Carlo simulations; production costs.

* Corresponding author: guperezv@ipn.mx
Received: 11-01-12. Accepted: 17-05-12.

Introducción

La volatilidad en el mercado del petróleo, la inestabilidad política de muchos países productores de crudo, la disminución de reservas probadas y su efecto en el cambio climático han propiciado que muchas instituciones, organizaciones y dependencias busquen formas alternativas para reducir el consumo de este tipo de combustibles (Bartuska, 2006). Una alternativa viable y usada desde hace varios años es la biomasa forestal la cual puede contribuir a reducir la dependencia de combustibles fósiles mediante la conversión de energía en sus diferentes formas como combustible para el transporte (Wyman, 1999; 2003; Perlack et al., 2005). Las características importantes de la biomasa vegetal, o la parte fibrosa y generalmente no comestible de los tallos, ramas y raíces de las plantas, son la abundancia, su capacidad de renovación y la contribución en la reducción de la emisión de gases efecto invernadero (Kim and Dale, 2005; Wang, 2005; Solomon *et al.*, 2007; Solomon, 2010)¹. Sus principales componentes, la celulosa y hemicelulosa, son azúcares que se pueden usar para producir etanol a través de hidrólisis y fermentación (USDE, 2006). La conversión y recuperación de los azúcares presentes en la celulosa y la hemicelulosa, aunque depende del tipo de especie, condiciones biofísicas y ambientales, puede alcanzar un rendimiento máximo de 90% (Hamelinck *et al.*, 2005). Sin embargo, los procesos actualmente usados para romper la biomasa en azúcares, y convertirlos en etanol, han mostrado ser ineficientes y constituyen una de las grandes barreras para generar etanol comercialmente (Solomon *et al.*, 2007). Alternativamente, la biomasa ha sido usada también como materia prima en industrias que utilizan petróleo o derivados para la generación de electricidad o calor (Caputo *et al.*, 2005).

El uso de biomasa en la conversión de energía no es una tecnología totalmente limpia, como la energía solar o el viento. En la extracción y transporte de biomasa, por ejemplo, el consumo de combustibles fósiles es necesario para el abasto, procesamiento y comercialización de la materia prima, pero al final el balance entre la energía que se genera y la que se consume es cercana a cero (Kim and Dale, 2005). De hecho, estudios han

encontrado que este balance energético no solo es cercano a cero sino positivo (Kim and Dale, 2005; Solomon *et al.*, 2007). A pesar de sus bondades, la biomasa no es considerada como la única alternativa para solucionar el problema de dependencia de petróleo. La conversión de energía a partir de la biomasa vegetal debe combinarse con otros tipos de tecnología limpia como la hidroeléctrica, solar o geotérmica para contribuir a la reducción en el consumo de combustibles fósiles y eventualmente para disminuir la emisión de gases efecto invernadero. Datos de la Secretaría de Energía en México muestran, por ejemplo, que el uso de la biomasa para conversión de bioenergía representa apenas el 3% de la energía total y la mitad de la energía renovable consumida en el país (SENER, 2011).

El bioetanol puede producirse a partir de dos fuentes de abastecimiento. La primera incluye plantas con altas concentraciones de almidón como el maíz y caña de azúcar y la segunda se basa en plantas con contenido de celulosa como los árboles, residuos agrícolas, pastos, etc. (Solomon *et al.*, 2007). Aunque la mayor parte de la producción mundial de bioetanol proviene de plantas con alta concentración de almidones (también llamado etanol de primera generación), existen varios problemas con esta fuente de abastecimiento. Los cultivos agrícolas (caso maíz y caña de azúcar) son insumos altamente demandados en la industria de alimentos y su uso en la producción de bioetanol desestabiliza el mercado de productos como la carne, azúcar, tortillas, etc. Estos cultivos demandan mayor manejo, uso de agua y otros insumos que a su vez requieren el uso de más energía (Hammerschlag, 2006). En contraste, el etanol celulósico (o lignocelulósico) no solamente no compite con los alimentos sino que reduce las emisiones de gases efecto invernadero y es más eficiente que el etanol de maíz (Solomon *et al.*, 2007). Su rendimiento de celulosa por unidad de área es mayor que el producido por los almidones de maíz y debido a las grandes escalas de producción, los costos de producción de etanol son menores (Hammerschlag, 2006; Farrel *et al.*, 2006).

Los residuos forestales son una efectiva fuente de abastecimiento de material para la producción de bioetanol debido a que su fuente es amplia, abundante y relativamente barata (Perez-Verdin *et al.*, 2009). Los

¹ Se admite el comentario de uno de los revisores de que la contribución en la reducción de gases efecto invernadero es cuestionable. Sin embargo, ese cuestionamiento puede venir por los diferentes métodos de evaluación del ciclo de vida de los biocombustibles que involucran diferentes procesos como Pozos-Bomba de Venta (Well-to-Pump), Pozos-Vehículos (Well-to-Wheel) o semilla-vehículo (Seed-to-Wheel). En este caso, las fuentes de información que se citan corresponden a un análisis Pozos-Vehículos (Well-to-Wheels).

residuos forestales incluyen además de las ramas de aprovechamientos forestales, los productos derivados de aclareos en bosques densos, así como los desperdicios de industrias forestales. En México, parte de los residuos forestales se utilizan para realizar obras de conservación de suelo o leña para consumo doméstico, pero la gran mayoría se corta en dimensiones pequeñas para reducir algún peligro de incendios forestales y favorecer su rápida descomposición al suelo orgánico. Los costos del acomodo de residuos y ramas son absorbidos por los propietarios y forman parte de las acciones o prácticas del buen manejo para el aprovechamiento forestal. Parte también de los desperdicios de las industrias forestales (aserrín, costeras, corteza, etc.) son quemados contribuyendo a la emisión de CO₂ y otros gases a la atmósfera (Lopez-Miranda *et al.*, 2009). La utilización de este tipo de residuos ayudaría además a reducir el riesgo de incendios forestales, incrementar la salud y paisaje forestal y generar fuentes de empleo.

En este trabajo, se presenta y analiza una metodología para estimar técnica y económicamente los residuos forestales de bosques de pino de clima templado frío para producir biocombustibles, particularmente etanol. La razón de enfocarse a los bosques del género *Pinus* como estudio de caso, se debe al gran potencial de productos forestales que tienen estos bosques, especialmente los del estado de Durango. Este estado, que se localiza al noroeste de México, tiene una superficie total de 12 millones ha de las cuales cerca del 27% son arboladas de pinos y en promedio anual se aprovechan alrededor de 1,5 millones de metros cúbicos. De manera específica el estudio evaluó la cantidad disponible de biomasa que potencialmente se puede utilizar para la conversión de etanol forestal y estimó los costos de producción y transformación de biomasa en bioetanol.

Metodología

Para los fines de este estudio, la biomasa forestal fue dividida en dos grupos: el primero involucra las ramas y puntas de los aprovechamientos forestales (no follaje), aclareos y eliminación de árboles muertos y/o indeseables. A este grupo se le denominará como residuos forestales. El segundo grupo incluye los desperdicios de las industrias forestales como aserrín, costeras, virutas y corteza. A este grupo se le denominará residuos industriales.

Estimación de residuos forestales

La información para la estimación de biomasa de residuos forestales de especies de pinos se basó en los datos del Inventario Forestal Periódico que ha realizado la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en todo el país y en los programas de manejo forestal que se hace de manera local para el aprovechamiento forestal. El muestreo de campo para el Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009, consistió en el levantamiento de alrededor de 7.000 sitios circulares de 400 m² distribuidos en las diferentes condiciones de vegetación de clima templado presentes en el estado (CONAFOR, 2009). Los sitios, arreglados en conglomerados de cuatro unidades en forma de “Y” invertida, tienen información dasométrica (como altura, diámetro, edad, etc.), topográfica (pendiente, exposición, altitud, etc.) y ecológica (suelos, erosión, cobertura herbácea, etc.). De las unidades de muestreo ubicadas en el estado, se seleccionaron aquellas donde hubo presencia de pino y se exportaron a un sistema de información geográfica (SIG) sobreponiéndose con el mapa de tipos de vegetación del Instituto Nacional de Geografía (INEGI). En el SIG, se estimó la superficie cubierta con vegetación forestal y con ambas fuentes de información (esto es, INEGI y CONAFOR) se aseguró que la estimación de biomasa incluyera únicamente áreas cubiertas con *Pinus* spp. Como resultado de las operaciones cartográficas, se identificaron 410 rodales de pino cuyas superficies varían entre 12 hasta 300.000 has (Figura 1). Estos rodales fueron la base para la estimación de biomasa de residuos forestales.

Se cuantificó la biomasa de residuos forestales por medio de un modelo alométrico desarrollado para varias especies de pinos de Durango y Chihuahua (Navar, 2009). La ecuación de tipo no lineal utiliza dos parámetros de ajuste y la variable de interés es el diámetro a la altura del pecho:

$$\hat{Y}_{ij} = \beta_1 (DAP_{ij})^{\beta_2} \quad [1]$$

Donde \hat{Y} es la biomasa seca (kg) de residuos forestales de la especie i y árbol j , β son los estimadores de regresión y DAP es el diámetro a la altura de pecho (cm) de la especie i y árbol j . Con fines prácticos y considerando las pequeñas diferencias en los parámetros de las ecuaciones, se utilizó una ecuación que generaliza todas las especies de pino en Durango. En este caso, $\beta_1 = 0,0565$ y $\beta_2 = 2,2729$ error estándar $S_{\bar{x}} = 84,32$ kg y $r^2 = 0,69$ (Navar, 2009). Con esta ecuación, se calculó la biomasa equivalente (t) por árbol y posteriormente se infirió al

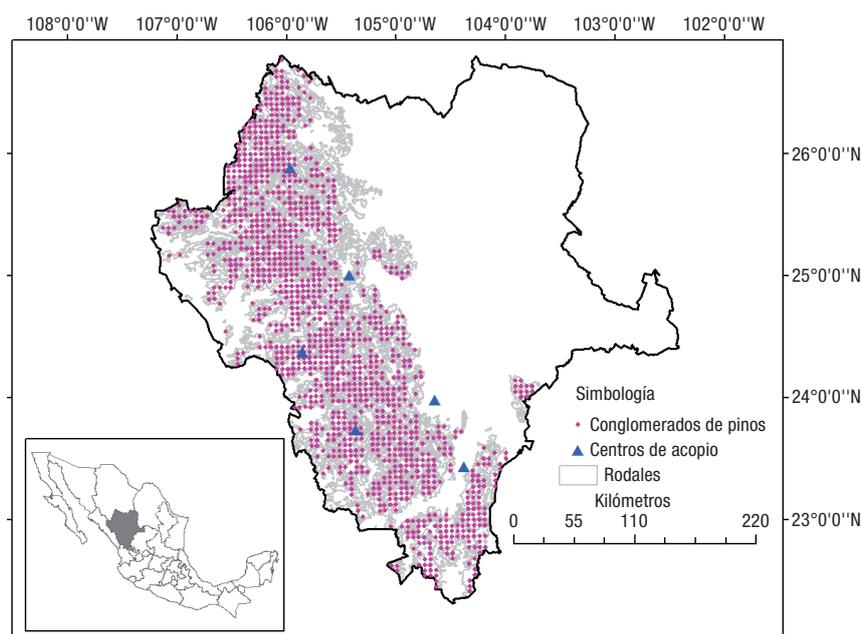


Figura 1. Ubicación del estado de Durango, centros de acopio y los rodales con los sitios del Inventario Forestal Nacional de las especies de pinos. Cada punto (conglomerado) consta, en promedio, de cuatro sitios adyacentes en forma de “Y” invertida. Fuente: Con información de CONAFOR (2009) e INEGI (2009).

sitio, hectárea y rodal. Posteriormente, utilizando los programas de manejo locales, se identificaron los tratamientos silvícolas más importantes, turno, remociones promedio por hectárea y por año en cada rodal. Con esta información, se determinó la cantidad de biomasa que puede generarse anualmente.

Restricciones ecológicas y económicas

La extracción de residuos forestales debe considerar ciertos aspectos ecológicos y económicos. La extracción total de este material puede estimular la pérdida de nutrientes y en algunos casos la erosión del suelo al dejar semidesnudo el suelo (Sanchez *et al.*, 2003). Existen muy pocos estudios que han evaluado la cantidad óptima de material orgánico que debe dejarse en el suelo para compensar la pérdida de nutrientes esenciales (p.e., Calcio, Magnesio, Potasio y Fosforo) por la extracción de material vegetal. Borjesson (2000) sugiere que la cantidad mínima de residuos que se requiere para mantener la fertilidad del suelo puede variar entre 0,8 y 2,2 t ha⁻¹ por periodo rotacional, dependiendo de las condiciones particulares de la zona. Utilizando los datos obtenidos, se calculó la biomasa respetando la recomendación hecha por Borjesson.

Debido a las características de los residuos forestales, equipo y maquinaria y tipos de caminos, no todo el material es económicamente viable para su extracción. Los residuos son por lo general piezas pequeñas distribuidas de acuerdo a la distribución de árboles cortados y requieren de suficiente mano de obra y equipos para su recolección. Los caminos son una de las principales restricciones para la extracción de este producto y no se consideró la construcción y/o remodelación de caminos con fines exclusivos de extracción de residuos forestales. Se consideró que la extracción de residuos forestales debe hacerse casi inmediatamente después de la extracción de productos primarios. Tomando como base estudios similares (Perlack *et al.*, 2005; Perez-Verdin *et al.*, 2009), se calculó la densidad de caminos a nivel municipio y se estableció un porcentaje de estimación de biomasa basado en su accesibilidad como sigue: 0,7 si la densidad de caminos (km km⁻²) es mayor a 0,24; 0,65 si la densidad varía entre 0,16 y 0,24 y 0,6 si la densidad es menor a 0,16. Los coeficientes de accesibilidad se multiplicaron por la biomasa residual después de la compensación por pérdida de nutrientes en el suelo.

Se estimó también un índice de distribución espacial mínimo de residuos forestales en función de la capacidad potencial de procesamiento de material y la dis-

tancia requerida para su transporte (Gan and Smith, 2006). Si este índice es bajo, se requerirá entonces una mayor área para asegurar el abastecimiento de la planta procesadora de etanol y eventualmente los costos de producción se incrementarían. Overend (1982) desarrolló un modelo que estima la distancia promedio de transportación en función de la productividad de la zona, la capacidad de la planta procesadora y el área. Overend determinó que la distancia promedio (\bar{R}) está dada por la ecuación siguiente:

$$\bar{R} = 0,6833\tau\sqrt{\frac{n}{\emptyset}}\sqrt{\frac{P}{M}} \quad [2]$$

donde τ es un factor de tortuosidad que se calcula como la relación entre la distancia de transporte y la distancia en línea recta al centro de colecta; n es el número de porciones que se requieren hasta completar un círculo; \emptyset es la proporción de área forestal con relación al área total; P es la capacidad de producción de la planta ($t \text{ dia}^{-1}$); M es la distribución espacial actual ($t \text{ ha}^{-1}$) y \bar{R} es expresado en km. Con la ecuación 2, se puede estimar entonces el índice de distribución espacial mínimo (M_{min}) del rodal i , como sigue:

$$M_{min(i)} = 0,467\frac{n\tau_i^2 P_{min}}{\emptyset_i \bar{R}_i^2} \quad [3]$$

Para estimar las distancias desde las áreas de producción a los puntos de procesamiento, se establecieron 6 centros de acopio o concentración ubicados en las principales ciudades del estado: (1) Guanacevi, (2) Santiago Papasquiaro, (3) San Miguel de Cruces, (4) Durango, (5) El Salto y (6) Mezquital (Figura 1). Estos centros representan el destino geográfico más cercano de los productos forestales y es donde se concentra la mayor parte de la industria forestal en la entidad, particularmente en la ciudad de Durango. Para disminuir los costos totales de producción, estos centros de acopio podrían también ser utilizados como centros de transformación. Utilizando un comando del SIG, a cada rodal se le determinó el centroide y de ese punto al centro de demanda se estimó la distancia de transporte real y su distancia en línea recta. Esta relación se usó para estimar el factor de tortuosidad (τ). La distancia promedio de transporte (\bar{R}) de todos los rodales fue de 81,5 km. Se consideró que el número de porciones n fuera 1, es decir el aprovechamiento de un rodal se haría en un solo paso, y la capacidad mínima de producción (P_{min}) igual a $200 t \text{ dia}^{-1}$ (esto es en función del potencial de biomasa que puede ser aprovechado una vez que las restricciones ecológicas y económicas fue-

ron impuestas). El índice M_{min} se comparó con la productividad actual de cada rodal. La productividad actual se calculó dividiendo la disponibilidad total del rodal entre la superficie ($t \text{ ha}^{-1}$). Si el índice M_{min} es mayor que la productividad actual, entonces la recolección de residuos forestales no es técnica y económicamente viable. Los rodales con características no viables fueron desechados en la estimación de biomasa de residuos forestales.

Estimación de residuos industriales

La estimación del aserrín y otros desperdicios industriales se hizo considerando el número de aserraderos en activo, el coeficiente de transformación y el porcentaje de residuos que no se reutiliza. Por diferentes circunstancias, el número de aserraderos (incluyendo fábricas de caja, empaques y productos secundarios) en activo se ha ido reduciendo paulatinamente en la entidad, pero la mayoría de las empresas se ubican en la ciudad de Durango. El coeficiente de aserrío o transformación se refiere a la capacidad que tiene un aserradero para transformar la madera rolliza en productos de escuadría o aserrados. En función del equipo, maquinaria y mano de obra, este coeficiente puede variar entre 50% hasta un 70%, donde porcentajes altos sugieren una mayor eficiencia del centro de transformación (Zavala-Zavala y Hernandez-Cortes, 2000). El aserrín ha tenido un moderado incremento en su demanda debido a que se ha venido usando en plantas productoras de tableros aglomerados y en la industria de pulpa y papel. Sin embargo, una buena parte del material simplemente se quema, especialmente en las poblaciones fuera de la ciudad de Durango donde inclusive, como el caso de costeras y otros desperdicios, se regalan a las personas para leña.

Para estimar la cantidad de residuos industriales, se utilizaron los datos del Registro Forestal Nacional (SEMARNAT, 2011), especialmente los relacionados con la inscripción de los centros de almacenamiento y/o transformación, su giro y capacidad de transformación real. Se llevó a cabo un muestro aleatorio de industrias para confirmar el estado activo de producción y el coeficiente de aserrío y determinar además el porcentaje de aserrín que puede ser reutilizable para bioenergía. Los datos resultantes fueron validados con la información que se deriva de la producción forestal anual de pino según el INEGI. A diferencia de los residuos forestales, no se consideraron otras restricciones

ecológicas y/o económicas. En la conversión de volúmenes a biomasa de aserrín, se usó una densidad específica de $0,3 \text{ t m}^{-3}$ (Lesme-Jaén y Oliva-Ruiz, 2010).

Costos de producción

La disponibilidad de residuos forestales para la generación de etanol está sujeta a varios costos de producción. Los costos más importantes son la extracción, transporte y procesamiento. Para los propósitos de este estudio, no se consideraron los costos de derribo del arbolado debido a que estos son costos absorbidos por productos convencionales no relacionados con el etanol (p.ej., aserrío, triplay, cajas para empaque, etc.). Además, la etapa de evaluación no consideró tampoco el proceso de procesamiento y comercialización, esto es la elaboración de etanol y la puesta del producto en las estaciones de venta. La extracción incluye el seccionamiento, separación y carga del material en los camiones de transporte. El transporte es quizás el componente más importante de los costos de producción por las distancias que deben recorrerse para traer el material a los centros de acopio o transformación. Además, de estos costos se incluyó uno también que potencialmente (aunque no actualmente) puede darse debido al mercado de etanol; esto es un pago por el producto a los dueños del bosque o industria forestal.

Debido a que a la fecha aún no hay una producción comercial de etanol a partir de residuos forestales en México, se utilizaron funciones de distribución probabilística para estimar un rango razonable de costos marginales dada la incertidumbre en la producción potencial de bioetanol. Los costos base que se utilizaron fueron los del material que se utilizan para celulosa (pulpa), papel y otros productos secundarios de cortas dimensiones. Estos productos reflejan mucho el tipo de material que podría ser utilizado para bioetanol, aunque este último puede utilizar productos aun con menores dimensiones. Las fuentes de información fueron las uniones de ejidos de Santiago Papasquiaro, El Salto y las empresas madereras e intermediarios que se dedican a la extracción de productos celulósicos como Grupo Papelero Scribe, S.A. de C.V, Maderas y Sintéticos S.A. de C.V. y además el Sistema de Precios de Productos Forestales (SIPRE) que lleva la CONAFOR.

Se usaron simulaciones Monte Carlo de riesgo basados en procesos aleatorios para cada uno de los costos de producción. Las simulaciones Monte Carlo consisten en la asignación de valores a los costos de

producción de acuerdo a ciertas funciones de distribución probabilística, definidas previamente por el usuario. El proceso de asignación de valores se repite iterativamente hasta que se cumple con ciertos parámetros de control y no hay variación significativa en las iteraciones (nivel de confiabilidad de 95%). Con base en el trabajo de Grebner *et al.*, (2009), se definieron funciones de distribución probabilística triangular y uniforme y se identificaron los valores más posibles así como los máximos y mínimos que podrían presentar en cada uno de los costos (Tabla 1). La función probabilística de tipo triangular se utiliza cuando hay información de los valores máximos, mínimos y los más posibles mientras que la función probabilística de tipo uniforme asume que el valor más aproximado ocurre entre un mínimo y un máximo con la misma probabilidad (Grebner *et al.*, 2009). Considerando que el costo de transporte es uno de los factores más importantes, las simulaciones Monte Carlo se desarrollaron variando el parámetro de distancia de 50 a 150 km (100 repeticiones) y 30.000 iteraciones en cada repetición. Los costos de producción de aserrín también fueron simulados con la técnica de Monte Carlo, pero la distancia no fue factor de variación debido a que los centros de producción de aserrío se encuentran cerca de los centros de transformación de etanol. Los costos del procesamiento, hidrólisis y fermentación, por su magnitud y el tipo de información analizada, son parte de un reporte especial de investigación por el autor principal, cuyo contenido está en preparación. Las simulaciones Monte Carlo se hicieron con la herramienta Risk Solver de Excel® y las unidades están expresadas en US dólares (US \$) a Noviembre del 2011.

Resultados y discusión

Disponibilidad de biomasa forestal

De los 410 rodales que se identificaron inicialmente, 49 rodales (150.499 ha) fueron segregados para la extracción de biomasa; esto por ser ecológica o económicamente no viables. En estos casos, el índice M_{min} fue mayor que la productividad actual del rodal. Después de aplicar las restricciones ecológicas y económicas, los resultados indican que alrededor de 211.200 toneladas de residuos forestales y 111.000 toneladas de residuos industriales se pueden aprovechar anualmente para la generación de bioetanol en Durango. Los centros de acopio con mayor cantidad de residuos fo-

Tabla 1. Costos de producción de biomasa forestal para la conversión de etanol. Los costos que se señalan para residuos forestales corresponden a una distancia de 80 km.

Costos (US \$)	Residuos forestales			Residuos industriales ²
	Valor más probable	Min.	Max.	
1. Extracción (\$/t) ^{1,2}	0,88	0,63	2,77	n/a
2. Costo de apilado + carga (\$/t) ^{1,2}	3,09	2,39	5,66	2,47
3. Transporte (variable) (\$/t) ¹	15,36	12,92	15,70	9,14
Fijo o arranque (\$/t) ¹	4,80	3,14	5,03	n/a
Variable (\$/t/km) ¹	0,13	0,12	0,13	n/a
4. Comisión de extraccionista (\$/t) ²	0,97	0,80	1,21	n/a
5. Derecho de monte (\$/t) ^{1,3}	2,74	n/a	3,70	9,38
6. Servicios técnicos ¹	0,38	n/a	0,62	n/a

¹ Fuente: Uniones de Ejidos Santiago Papasquiario y El Salto. ² Fuente: Grupo Papelero Scribe S.A. de C.V., intermediarios de Maderas y Sintéticos S.A. de C.V. ³ Se refiere al pago por el uso del producto ya sea al dueño del bosque o de un aserradero (industria).

restales son Santiago Papasquiario y San Miguel de Cruces, los cuales acaparan la mitad del total estatal. Sin embargo, la generación de desperdicios industriales se da mayoritariamente en la ciudad de Durango con cerca del 53% del total. Utilizando un factor de conversión de 300 litros por tonelada y una eficiencia de 40% (Hamelinck *et al.*, 2005), la biomasa forestal aquí estimada puede utilizarse para producir entre 35 y 40 millones de litros de etanol por año (Tabla 2).

La proporción de residuos forestales e industriales equivale al 40% de la producción estatal anual maderable de pinos. Esto significa que 2,5 toneladas de madera, extraídas para fines comerciales convencionales (p.ej. madera), generan alrededor de una tonelada de ramas, puntas, aserrín y otros desperdicios. De acuerdo con datos del INEGI, en los últimos 10 años el promedio anual de la producción forestal maderable de pinos es de aproximadamente 850.000 t (1,45 millones de m³r)². Dadas las estimaciones anteriores y el mercado actual de madera, es posible que la cantidad total de biomasa estimada anteriormente se mantenga constante en el corto plazo.

Una de las grandes ventajas que tiene la generación de bioetanol a partir de residuos forestales e industriales es la reducción en la emisión de gases de Carbón a la atmósfera (Solomon *et al.*, 2007) ya sea como combustible único o mezclado en diferentes proporciones

con la gasolina. La proporción 10% etanol y 90% gasolina fue la primera mezcla aprobada por agencias gubernamentales como la de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, siglas en Inglés) y ha sido usada en la mayoría de los vehículos sin hacer muchas modificaciones a los motores (Snow, 2011). Siguiendo el modelo de Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation (GREET) (Wang, 2005), la cantidad de Carbón que se puede reemplazar por la combustión de etanol (considerando una mezcla de 10-90) sería de aproximadamente 220.000 t CO_{2e} por año, lo que equivale al 20% del total de emisiones de CO₂ por toda la flota vehicular en Durango³. Alternativamente, ese carbón ahorrado puede ser comercializado en los mercados voluntarios de CO₂ como Chicago Climate Exchange o European Climate Exchange.

Las simulaciones Monte Carlo indican que el costo promedio de la biomasa de residuos forestales es de US \$23,8 por tonelada (US \$0,20 L⁻¹ etanol) mientras que el de residuos industriales es de US \$22,6 por tonelada (US \$0,19 L⁻¹) (Tabla 3). Los costos con mayor proporción en la determinación del costo total de la biomasa fueron el transporte (residuos forestales) y pago a dueños de industrias (residuos industriales) (Figura 2). Las simulaciones indican también que el costo promedio de los desperdicios industriales es tan alto como el costo de residuos forestales traídos desde

² La conversión de metros cúbicos a toneladas se hizo utilizando una gravedad específica de la madera de 0,46 g cm⁻³ (Navar, 2009) y 28% de contenido de humedad.

³ Cada vehículo en promedio genera alrededor de 5,23 t CO₂ equivalente por año. Para estimaciones de emisión de gases por vehículos de gasolina su usó información de la Agencia Ambiental de Protección de los EUA (EPA, 2011). La flota vehicular del estado de Durango es de 211.388 (INEGI, 2009).

Tabla 2. Estimaciones de biomasa forestal para la generación de bioetanol en Durango*

Centro demanda	Distancia promedio (km)	Residuos forestales (ton)		Residuos industriales (t año ⁻¹)	Etanol (L año ⁻¹)
		Total	Anual		
Mezquital	68,8	1.969.115	15.753	3.124	2.265.225
Durango	92,0	3.050.824	24.407	58.736	9.977.145
El Salto	47,7	3.572.328	28.579	24.132	6.325.250
Guanaceví	67,4	4.443.554	35.548	6.167	5.005.871
San Miguel de Cruces	52,2	6.410.216	51.282	7.934	7.105.934
Santiago Papasquiaro	120,5	6.958.777	55.670	10.818	7.978.536
Total		26.404.814	211.239	110.911	38.657.901

* Las estimaciones se basan, además de las restricciones económicas y ecológicas, en un periodo laborable de 330 días por año, un rendimiento de 300 L de etanol por tonelada de biomasa, 37% de eficiencia en la conversión (Hamelinck *et al.*, 2005) y un turno forestal de 50 años.

una distancia de 70 km, debido principalmente a la demanda que recientemente ha generado su uso en la fabricación de tableros aglomerados y papel. La producción de bioetanol enfrenta entonces un gran reto al estar compitiendo con productos tecnológica y comercialmente definidos.

De las 110.911 t que se estimaron de residuos industriales, la proporción puramente de aserrín es de 30% (33.273 t). El resto lo constituyen los desperdicios de costeras, recortes, corteza y madera sólida de baja calidad. El costo promedio ponderado de todo el material disponible (322.149 toneladas de residuos forestales e industriales) es de US \$0,23 L⁻¹ etanol. Esto representa alrededor de un 10% más de su costo original, debido a la variabilidad en los radios de abastecimiento y a la biomasa disponible en cada rodal. Sin embargo, las simulaciones Monte Carlo indican que el costo unitario (\$ t⁻¹ km⁻¹) tiene una tendencia negativa

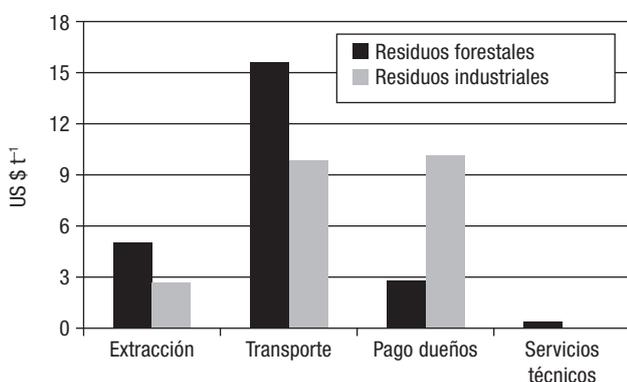


Figura 2. Contribución de los costos individuales al costo total de la biomasa forestal en Durango. En el caso de los residuos industriales, la extracción se refiere a los costos de apilado y carga, mientras que en los residuos forestales la extracción incluye corte, desrame y carga.

a medida que la distancia se agranda (Figura 3). Esto puede deberse a los efectos de economía de escala donde a pesar de que los insumos se incrementan, los costos de transporte se abaten por efectos de expansión (Samuelson y Nordhaus, 2010).

El análisis de los coeficientes de correlación jerarquizados, que miden la fuerza de asociación entre cada uno de los costos individuales y el costo total en las simulaciones Monte Carlo, indican que el costo individual más importante para los residuos forestales lo constituye el pago por derecho de monte (0,58), seguido del costo de apilado y carga (0,52), transporte (0,45) y extracción (0,34). En el caso de los residuos industriales, el costo más importante fue el pago al dueño del aserradero (0,88) y el transporte (0,40). En ambos casos, el pago que se da a los propietarios, ya sea de

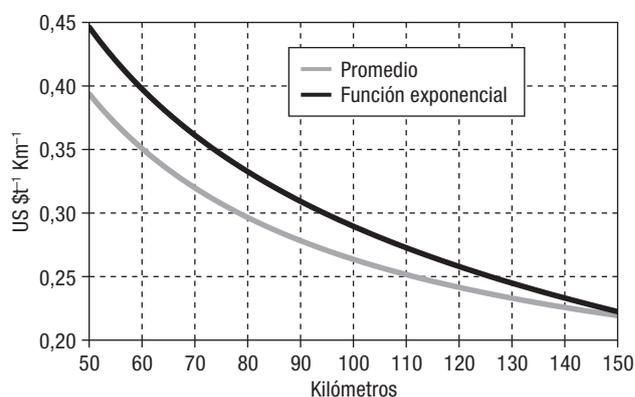


Figura 3. Costos unitarios de producción de residuos forestales e industriales en Durango, México. La función promedio se refiere a la estimación de costos en relación directa a la distancia. La función exponencial se refiere al uso de un modelo exponencial de la forma $\text{Costo} = 2,76e^{-0,003(\text{km})}$ ($p < 0,001$, $r^2 = 0,92$). Fuente: Con información propia, SIPRE, Scribe, SA de CV y MASISA.

Tabla 3. Resumen de las simulaciones de Monte Carlo de los costos totales de producción para residuos forestales e industriales. Los datos de residuos forestales corresponden a una distancia de 80 km.

Parámetro	Residuos forestales		Residuos industriales	
	(US \$ t ⁻¹)	(US \$ L ⁻¹ etanol)*	(US \$ t ⁻¹)	(US\$ L ⁻¹ etanol)*
Promedio	23,78	0,20	22,67	0,19
Desv. Estándar	1,33	0,01	1,49	0,01
Valor al 95% riesgo	25,95	0,22	25,37	0,21
Mínimo	18,74	0,16	19,22	0,16
Máximo	28,30	0,24	27,90	0,23
Rango	9,56	0,08	8,67	0,07
Error Estándar	0,10	0,00	0,12	0,00
Num. de simulaciones	30.000		30.000	

* Los costos por litro de etanol consideran un rendimiento de 300 litros de etanol por tonelada y una eficiencia de conversión de 40% (Hamelinck, 2006).

terrenos forestales o aserraderos, tiene un impacto muy alto en el costo total de la biomasa forestal, a pesar de que la materia prima se considera como desperdicio.

Análisis de sensibilidad

La disponibilidad y los costos de producción de la biomasa están sujetos a varios factores externos, entre ellos la eficiencia tecnológica de conversión de biomasa, el potencial tamaño de la planta procesadora de biomasa y los productos sustitutos, entre otros. Para llevar a cabo un análisis de sensibilidad de estos factores, se usaron hojas de datos de Excel® con celdas cambiantes y fijas para evaluar los cambios en el precio de un litro de etanol. El precio base del litro de etanol se estableció en US \$0,20.

Hamelinck *et al.* (2005) y Lopez-Miranda *et al.* (2009) sugieren que la actual tecnología de producción de etanol, basado en hidrólisis y fermentación, puede incrementarse desde un 40% hasta un 48% si el pretratamiento base y otros procesos biotecnológicos son mejorados. Estos cambios repercutirían en menores costos de producción del etanol (Tabla 4). Por ejemplo, aumentar hasta un 48% la eficiencia de conversión, lo cual significa utilizar menos biomasa, reduce los costos de producción en un 20%. En cambio, bajar la eficiencia en 35% hace que el precio del etanol aumente 12%. La distancia de abastecimiento de materia prima también tiene un efecto similar en los costos de producción de etanol. Si la distancia promedio disminuye a 60 km, el precio de un litro de etanol también disminuye en un 12%. Si la distancia aumenta a 100 km, el precio del etanol aumenta en un 10%. El tamaño de las plantas

transformadoras no tiene el mismo impacto en la producción de etanol como la eficiencia tecnológica o la distancia. Si la capacidad de producción de la planta se incrementa, a pesar de que más rodales y más superficie se excluyen por efecto del índice de distribución espacial mínimo de residuos forestales, el impacto sobre el precio del etanol es marginal. Esto se debe a que los rodales que se segregan son de muy baja productividad y su contribución a la biomasa total es mínima.

Uno de los costos de producción que tiene más correlación con el precio del etanol es aquel que se paga a los dueños de terrenos forestales (derecho de monte) o aserraderos por la materia prima. A pesar de que este material podría considerarse como desecho de un proceso principal y no tendría que pagarse un solo centavo, se determinó eventualmente un costo promedio y máximo para evaluar su comportamiento si en el futuro se incrementa su demanda (ver Tabla 1). De esta manera, un costo de cero dólares t⁻¹ arrojaría un cambio de -12,7% en el precio del litro de etanol, mientras que un costo de US \$4,4 t⁻¹ incrementaría el precio hasta un 20,6%.

Otra amenaza para el desarrollo comercial de biocombustibles a partir de residuos forestales e industriales es la competencia que puede generarse por productos sustitutos como la producción de tableros aglomerados, pulpa y papel (Joelsson and Gustavsson, 2008). Estos productos prácticamente pueden consumir todo el aserrín y dejar con pocas oportunidades a la producción de bioetanol. En Durango, las empresas Maderas y Sintéticos S.A. de C.V. e Industrias Centauro S.A. de C.V. consumen grandes proporciones del aserrín que se genera en el estado y en ocasiones lo importan de estados vecinos. Un cambio en la demanda de desperdicios industriales modificaría también el

Tabla 4. Análisis de sensibilidad en la producción de etanol a partir de biomasa forestal en Durango.

Parámetro	Estimación base	Cambio 1 (% de impacto) ^a	Cambio 2 (% de impacto) ^a
Eficiencia Tecnológica (%)	40	35 (12,7)	48 (-19,8)
Tamaño planta (t día ⁻¹) ^b	200	300 (0)	500 (0)
Distancia de abastecimiento (Km)	80	60 (-12,1)	100 (10,6)
Costo pagado a dueños (US \$ t ⁻¹)	2,74	0 (-12,7)	4,44 (20,6)
Competencia productos sustitutos (t) ^c	110.911	88.729 (6,0)	66.546 (11,9)

^a El porcentaje de cambio se realizó sobre un precio de etanol de US \$0,20 por litro. ^b El impacto del tamaño de planta se basó en la Ecuación (3). ^c Los productos sustitutos son pulpa (o celulosa), papel y tableros aglomerados. Los cambios se relacionan a una reducción en la disponibilidad de desperdicios industriales.

precio del etanol debido a la reducción en la disponibilidad y a los costos variables que ello acarrea.

Es difícil de predecir la competencia por materia prima entre las industrias de bioetanol, pulpa, papel y tableros aglomerados en el mediano y largo plazo. La producción de pulpa y papel ha estado sujeta a la volatilidad en los mercados internacionales lo que ha propiciado una masiva importación de otros países (Flores-Velazquez, 2007). Tan solo en el 2009, por ejemplo, el déficit comercial de pulpa y papel llegó a 1,2 y 3,5 millones de toneladas, respectivamente (FAO, 2011). Por otro lado, la baja en la producción petrolera y la volatilidad del mercado del crudo demandan una búsqueda de combustibles alternos como el bioetanol. Estas indicaciones sugieren a su vez que la industria de etanol a partir de lignocelulósicos este estratégica y políticamente mejor asentada que la de pulpa y papel para desarrollarse local y nacionalmente. Esto no quiere decir, sin embargo, una desaparición de las industrias de pulpa, papel y tableros aglomerados, sino más bien una transformación integral de la industria forestal que pueda eventualmente procesar varios productos en un mismo proceso. La idea del desarrollo de biorefinerías integradas es discutido en Coleman and Stanturf (2006), Demirbas (2009), Dos Santos (2010) y Hämäläinen *et al.* (2011), entre otros.

Conclusiones

En este estudio se realizó una evaluación de la disponibilidad y de los costos de producción de la biomasa

forestal como materia prima para la generación de bioetanol. La disponibilidad de biomasa consideró varias restricciones ecológicas y técnicas, incluyendo la compensación al suelo por pérdida de nutrientes, distancia de transporte, tasa de recuperación de acuerdo a la densidad de caminos y la distribución espacial de residuos forestales. Los resultados indican que alrededor de 322.000 toneladas por año pueden utilizarse para la producción de bioetanol. De esa cantidad, el 66% corresponde a residuos forestales y el resto a aserrín, costeras y otros desperdicios industriales. Considerando un coeficiente de eficiencia de 40% y rendimiento de 300 litros por tonelada, la biomasa disponible puede utilizarse para producir alrededor de 38 millones de litros de etanol por año.

Las simulaciones Monte Carlo indican que el costo promedio de residuos forestales es de US \$23,8 por tonelada (US \$0,20 L⁻¹) mientras que el de desperdicios industriales es de US \$22,6 por tonelada (US \$0,19 L⁻¹). La poca diferencia en el costo unitario de los residuos forestales e industriales, se debe a la gran demanda y al alto valor de venta de los segundos, aun cuando se trata de productos derivados de una transformación primaria. El costo promedio de los desperdicios industriales es tan caro como el de los residuos forestales traídos desde una distancia de 70 km, debido principalmente a la demanda que ha generado su uso en la fabricación de tableros aglomerados, fibra orientada y papel. El costo unitario del etanol tanto de residuos forestales e industriales (US \$0,19 y 0,20 L⁻¹, respectivamente), representa el 26% del precio de la gasolina magna en Méxi-

co. Sin embargo, a estos costos se deben sumar los correspondientes al procesamiento (pre-tratamiento, hidrólisis y fermentación), transporte y comercialización del etanol hasta su operación en plantas de venta.

El análisis de los coeficientes de correlación sugiere que el factor con mayor asociación con el costo total fue el pago que se hace a los dueños de terrenos forestales (residuos forestales) o a los dueños de aserraderos e industrias (desperdicios industriales). El análisis de sensibilidad indica también que los parámetros que tienen una gran influencia en el precio del etanol son la eficiencia tecnológica, el pago a dueños y los costos de transporte (distancia). Los costos de transporte de los residuos forestales (66% del costo total) y el pago a las industrias por los desperdicios industriales (45% del costo total) pueden ser las mayores limitantes para desarrollar proyectos que involucren el aprovechamiento de la biomasa forestal para generar biocombustibles. Una reducción en los costos de transporte puede darse por el eventual uso de medios más baratos (como ferrocarril), densificación del material y/o el establecimiento de industrias cercanas a las áreas de producción.

La competencia por productos sustitutos como la pulpa, papel y tableros aglomerados, etc., es otra barrera que la biomasa forestal puede enfrentar en la producción de etanol. Aunque el mercado nacional de pulpa y papel ha mostrado cierta inconsistencia en los últimos años, es incierto como estos productos pueden competir con este combustible en el corto o mediano plazo. Hay evidencias de que el mercado de bioetanol puede traer grandes beneficios y que auguran un futuro prometedor en el uso de biomasa forestal. Sin embargo, de acuerdo a nuestro análisis un cambio en la demanda de desperdicios industriales por otras industrias influye considerablemente en el precio del etanol debido a la reducción en la disponibilidad y a los costos variables que ello acarrea. Una solución factible y a largo plazo es el desarrollo de biorefinerías integradoras que transformen materias primas para diferentes productos en un mismo proceso o planta transformadora.

Se recomienda a las agencias gubernamentales y organismos descentralizados considerar el uso de bioetanol a partir de lignocelulósicos por su papel contribuyente en la reducción de gases efecto invernadero ya que es una fuente renovable y abundante. Para apoyar el desarrollo del bioetanol y tener indicadores de eficiencia que ayuden a la toma de decisiones, se recomienda también realizar estudios del balance energético o ciclo de vida para evaluar los insumos requeridos en la conversión de una unidad de energía contenida en este combustible.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los apoyos brindados en la elaboración de este estudio. Parte del financiamiento se obtuvo de los proyectos SIP-20100317 y de la Red de Medio Ambiente del IPN. Se agradece también a la CONAFOR, SEMARNAT y a las empresas industriales en Durango por los apoyos logísticos en la toma y manejo de información.

Bibliografía

- Bartuska A. 2006. Why biomass is important-The role of the USDA Forest Service in managing and using biomass for energy and other uses. Speech given at 25x25 Summit II, Washington, D.C. Available at www.fs.fed.us/research/pdf/biomass_importance.pdf (Ultimo acceso Noviembre 25, 2011).
- Borjesson P. 2000. Economic valuation of the environmental impact of logging residue recovery and nutrient compensation. *Biomass and Bioenergy* 19, 137-152.
- Caputo AC, Palumbo M, Pelagagge PM, Scacchia F. 2005. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: Effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy* 28(1), 35-51.
- CONAFOR (COMISION NACIONAL FORESTAL), 2009. Guía para el uso del archivo de consulta del inventario nacional forestal y de suelos. Guadalajara, Jal. (Documento en impresión).
- Coleman MD, Stanturf JA. 2006. Biomass feedstock production systems: Economic and environmental benefits. *Biomass Bioenergy* 30(8-9), 693-695.
- Demirbas MF. 2009. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy* 86 (1), S151-S161.
- Dos Santos BMA. 2010. Biofuel's engineering process technology. InTech publisher. Rijeka, Croacia. 732 p.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2011. Greenhouse gas equivalences calculator. Disponible en <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/calculator.html#results>. (ultimo acceso Noviembre 25, 2011).
- Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, O'Hare M, Kammen DM. 2006. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311(5760), 506-508.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2011. Estadísticas forestales. Información en línea disponible en <http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx#ancor> (ultimo acceso, Noviembre 25, 2011).
- Flores-Velázquez R, Serrano-Gálvez E, Palacio-Muñoz VH, Chapela G. 2007. Análisis de la industria de la madera aserrada en México. *Madera y Bosques* 13(1), 47-59.

- Gan J, Smith CT. 2006. Availability of logging residues and potential for electricity production and carbon displacement in the USA. *Biomass and Bioenergy* 30, 1011-1020.
- Grebner DL, Perez-Verdin G, Sun C, Munn IA, Schultz EB, Matney TG. 2009. Woody biomass feedstocks: a case study on availability, production costs, and implications for bioenergy conversion in Mississippi. In *Renewable energy from forest resources in the United States*, Eds. B. Solomon, and V. Luzadis, (pp. 261-280). New York, NY: Routledge-Taylor & Francis
- Hämäläinen S, Näyhä A, Pesonen H-L. 2011. Forest biorefineries - A business opportunity for the Finnish forest cluster. *Journal of Cleaner Production*. DOI:10.1016/j.jclepro.2011.01.011. Article in Press.
- Hamelinck CN, Van Hooijdonk G, Faaij AP. 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle, and long term. *Biomass and Bioenergy* 28, 384-410.
- Hammerschlag R. 2006. Ethanol's energy return on investment: a survey of the literature 1990-present. *Environmental Science and Technology* 40(6), 1744-50.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2009. Anuario estadístico 2008. Información disponible en línea en la página: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sisnav/default.aspx?proy=ae&edi=2009&ent=10> (ultimo acceso Noviembre 25, 2011).
- Joelsson JM, Gustavsson L. 2008. CO₂ emission and oil use reduction through black liquor gasification and energy efficiency in pulp and paper industry. *Resources, Conservation and Recycling* 52, 747-763.
- Kim S, Dale BE. 2005. Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy* 28, 475-489.
- Lesme-Jaén R, Oliva-Ruiz L. 2010. Potencial energético de los residuos de la industria de la madera en el aserrío "El Brujo" de la empresa Gran Piedra Baconao, para la generación de energía eléctrica a partir de un grupo gasificador-motor de combustión interna-generator eléctrico. *Tecnología Química XXX* (1), 97-101.
- López-Miranda J, Soto-Cruz NO, Rutiaga-Quñones OM, Medrano-Roldán H, Arévalo-Niño K. 2009. Optimización del proceso de obtención enzimática de azúcares fermentables a partir de aserrín de pino. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25(2), 95-102.
- Navar J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257(2), 427-434
- Overend RP. 1982. The average haul distance and transportation work factor for biomass delivered to a central plant. *Biomass* 2, 75-79.
- Perez-Verdin G, Grebner DL, Sun C, Munn IA, Schultz E, Matney TG. 2009. Woody biomass availability for bioethanol conversion in Mississippi. *Biomass and Bioenergy* 33, 492-503.
- Perlack RD, Wright LL, Turhollow AF, Graham RL. 2005. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply. Rept. DOE/GO-102005-2135. U.S. Dept. of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
- Samuelson PA, Nordhaus WD. 2010. *Economía. Con aplicaciones a Latinoamérica*. McGraw-Hill, Mexico, D.F. 716 pp.
- Sanchez FG, Carter EA, Klepac JF. 2003. Enhancing the soil organic matter pool through biomass incorporation. *Biomass and Bioenergy* 24(4), 337-349.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2011. Registro Forestal Nacional. Archivo digital disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/forestalsuelos/Paginas/registroforestal-nacional.aspx>, (ultimo acceso Noviembre 25, 2011).
- SENER (Secretaría de Energía), 2011. Sistema de Información Energética. Disponible en <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController> (ultimo acceso Noviembre 25, 2011).
- Snow N. 2011. EPA extends E15 waiver to 2001-06 model year cars, trucks. *Oil and Gas Journal* 109 (5), 20-22.
- Solomon BD, Barnes JR, Halvorsen KE. 2007. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy. *Biomass Bioenergy* 31(6), 416-425.
- Solomon BD. 2010. Biofuels and sustainability. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185, 119-134.
- USDE (U.S. Department of Energy), 2006. Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: A joint research agenda. Rept. DOE/SC-0095. Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Rockville, Maryland.
- Wang M. 2005. Updated energy and greenhouse gas emission results of fuel ethanol. The 15th International Symposium on Alcohol Fuels. September 26-28, 2005. San Diego, CA, USA. Disponible en <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/375.pdf> (Ultimo acceso, Noviembre 25, 2011).
- Wyman CE. 1999. Biomass ethanol: Technical progress, opportunities, and commercial challenges. *Annual Review of Energy and the Environment* 24, 189-226.
- Wyman CE. 2003. Potential synergies and challenges in refining cellulosic biomass to fuels, chemicals, and power. *Biotechnology Progress* 19, 254-262.
- Zavala-Zavala D, Hernandez-Cortez R. 2000. Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques* 6(2), 41-55.