

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOETANOL DE MANERA SOSTENIBLE A PARTIR DE BIOMASA DE NOPAL (*OPUNTIA FICUS*) EN LA ZONA NORTE DEL ESTADO DE MEXICO

M. en C. Blanca Gabriela. Cuevas González¹, Dra. Patricia Delgadillo Gómez²,
Dra. Thelma Beatriz Pavón Silva³

Resumen—El objetivo del presente trabajo es determinar la rentabilidad financiera de inversión en una planta de bioetanol a partir de nopal (*Opuntia ficus*) en la zona norte del estado de México. Se trabaja en el área de estudio, buscando recopilar, crear y analizar en forma sistemática un conjunto de antecedentes económicos que permitan juzgar cualitativa y cuantitativamente las ventajas y desventajas de asignar recursos a una determinada iniciativa como sería en la producción de bioetanol. Con una producción de 100-8000 plantas por hectárea, se podría obtener una media de entre 300 y 3000 L de etanol en plántulos no regadas y con riego, respectivamente. Debido los precios internacionales del petróleo la alternativa de generar etanol a partir de los cladodios o bien de los azúcares presentes en la tuna podrían en un futuro cercano ser una realidad, no sin antes verificar el balance energético de dichas opciones.

Palabras clave— Opuntia, energías alternas, bioenergía, bioetanol

Introducción

Ante el reto de responder a las necesidades del país en la búsqueda de nuevas fuentes energéticas, el nopal (*Opuntia*) presenta ventajas en relación a otras especies dado que su alta eficiencia productiva, amplio rango de adaptación, rápido crecimiento y bajos requerimientos de insumos, constituye una opción energética viable, ya que de sus tallos y frutos es posible obtener biogás, biodiesel y bioetanol o productos que pueden ser empleados directamente Méndez (Gallegos S. de Jesus et al. 2010).

Los precios internacionales de etanol se estabilizaron a partir de 2016. Los precios de los biocombustibles, al igual que los de materias primas para biocombustibles, mantenían una tendencia ascendente la evolución de los mercados durante este tiempo se sigue impulsando por políticas públicas ya que están sujetas a incertidumbres y a proyecciones que generan supuestos durante las próxima década.

Se aprecia en un futuro requerimientos de combustibles alternativos que puedan dar respuesta al abastecimiento energético, una de las soluciones se presenta en los bioenergéticos a base de la biomasa de nopal, donde se presenta una solución al aprovechamiento generado en el sistema productivo agrícola semiárido.

Sin embargo, poco pueden aportar si la producción de biocombustibles no resulta un negocio atractivo. El objeto del presente trabajo consiste en determinar la factibilidad económica-financiera de invertir en una planta de producción de biocombustibles (biogás, biodiesel y bioetanol) a partir del nopal (*Opuntia ficus*) según reporta Bravo en 1978. En la zona norte del estado de México donde se reporta por parte del Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP) una superficie sembrada de 888.50 ha con una superficie de cosecha de 870.50 Ha y una producción por ton/Ha de 81,093.52 y un rendimiento producción por tonelada del 93.16% en el 2014 donde el municipio más productivo, lo ocupa Otumba con 446 Has sembradas con un rendimiento de 50,084.80 ton/ha con estas cantidades se puede contar con la prima y la ventaja de estar cerca la Unidad Académica Profesional Acolman (UAPA) de la zona favorece el estudio ya que sería una propuesta para ofrecer una alternativa de aprovechamiento diferente al consumo alimenticio como sería la generación de recursos energéticos.

El interés del proyecto radica en que la materia prima es tolerante a la sequía donde el cultivo es en un medio ambiente semiárido, marginal y no compite con los principales cultivos alimentarios para la fabricación de biocombustibles en el creciente desarrollo de tecnologías verdes con procesos sustentables y que son una alternativa al empleo de combustibles fósiles (Altshuler, J. 201).

¹ La M. en Ing. Amb. es Profesor Tiempo Completo de la Unidad Académica Profesional Acolman UAEM, Camino de Caleros No. 11 Col. Ejidos de Santa Catarina Acolman Edo de México, México. bgcuevasg@uaemex.mx (autor corresponsal)

² La Dra. en T.I.E. Patricia Delgadillo Gómez es Profesor de Tiempo Completo de Informática Administrativa, Centro Universitario Ecatepec UAEM, Av. José Revueltas No. 17 Col. Tierra Blanca 55020 Ecatepec, Estado de México, México pdelgadillo@uaemex.mx

³ La Dra. en Ing. Thelma Beatriz Pavón Silva es Profesor Tiempo Completo de la Unidad Académica Profesional Acolman UAEM, Camino de Caleros No. 11 Col. Ejidos de Santa Catarina Acolman Edo de México, México. tbpavons@uaemex.mx

En 1975, con el lanzamiento del Programa Nacional de Alcohol (PROALCOÓL), en Brasil, se puso en marcha el que es considerado como el primer y mayor programa de energías renovables a gran escala hasta la fecha, cuyo objetivo era la de estimular la sustitución de las gasolinas por alcohol, y en consecuencia, reducir la dependencia del país frente a la utilización de combustibles fósiles (en relación a la importación de petróleo).

Hoy en día, los biocombustibles se han transformado en una fuente natural e importante de energía alternativa. Debido a la volatilidad del precio del petróleo, al eventual agotamiento de los combustibles fósiles y al calentamiento global, estos combustibles son cada vez más utilizados a nivel mundial (García Tapia, N. & Carrillo Castillo, J. 2002). Los biocombustibles constituyen la primera fuente de energía que conoció la humanidad. Entre las fuentes de los biocombustibles, están la biomasa proveniente de cultivos como caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca y otros, usada para producir etanol, y los aceites provenientes de palma africana, soja, higuera, jatrofa curcas, colza y otras plantas, utilizados para producir biodiesel esto reportado por Instituto Interamericano de Cooperación Para La Agricultura (IICA) en el 2007.

A la hora de hablar de los biocarburantes existe una primera división entre los de primera generación y segunda generación. Aunque no es del todo clara, se consideran de segunda generación aquellos que utilizan materias primas no convencionales (biomasa lignocelulósica, residuos agrícolas, fracción orgánica de RSU, algas), los que se obtienen a partir de procesos complejos (Fischer-Tropsch) y presentan una elevada capacidad de reducción de emisiones de efecto invernadero y de ahorro energético. El problema de esta tipología es que no es una alternativa factible a corto plazo, ya que está empezando a dar sus primeros pasos.

Según la IEA (International Energy Agency), se puede hacer la siguiente clasificación:

- Biocombustibles de Primera generación: Son aquellos que en la actualidad ya han alcanzado la etapa de producción comercial. En general, proceden de cultivos que utilizan técnicas similares a las de las cosechas agrícolas alimenticias.

- Biocombustibles de Segunda generación o lignocelulósicos: No compiten por la utilización de suelos agrícolas, sino que son producidos a partir de biomasa lignocelulósica como la contenida en la paja, hierba, tallos, cañas, raíces, madera, cáscaras, etc. Los biocombustibles de segunda generación se encuentran en fase precomercial.

- Biocombustibles de Tercera generación: Son, principalmente, los aceites procedentes de algas y otros microorganismos, así como el hidrógeno procedente de la biomasa.

Los biocombustibles comprenden diversos combustibles líquidos y gaseosos derivados de la biomasa. Los biocombustibles de primera generación se obtienen a partir de los cultivos alimentarios e incluyen al bioetanol a base de caña de azúcar, almidón y el biogasóleo a base de semillas oleaginosas. Los biocombustibles de segunda generación se derivan de productos agrícolas y forestales distintos de los cultivos alimentarios y aprovechan la lignina, celulosa y hemicelulosa de la planta (Elizondo 1987).

Aún se encuentran en una fase incipiente de desarrollo, muy lejos de su producción a gran escala y, por tanto, de su comercialización, por lo que se espera que no se alcance una gran producción en el corto plazo.

El biodiesel es un combustible líquido que sirve como reemplazo del gas oil (diésel oil por su nombre en el mercado internacional) y produce a partir de materias primas renovables (biomasa) como ser aceites y grasas vegetales o animales. Se trata de ésteres monalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplea en los motores de ignición de compresión (motores diésel) o en calderas de calefacción. Las condiciones ambientales y las variables fisiológicas se asocian con un amplio rango de ecosistemas semiáridos con flora y faunas diversas en el norte del estado de México, donde opuntia es abundante y está ampliamente distribuida en comunidades específicas llamadas nopalera. El género opuntia está representado por 104 especies, las más importantes son: opuntia leucotricha, o. streptacantha, o. robusta, o. cantabrigiensis, o. rastrera, o. lindheimeri y o. phaeacantha (Bravo, 2008).

La producción sostenible de biocombustibles lignocelulósicos requiere un suministro suficiente de materias primas de biomasa como el nopal opuntia representa un cultivo bioenergético adecuado para producción de materia prima en tierras marginales semiáridas. Esta ha ganado interés como materia prima para biocombustibles debido a su alta eficiencia que no compite con los principales cultivos de alimentos o materias primas para biocombustibles convencionales lo que indica que esta materia prima de biomasa sería mucho menos recalcitrante a biomasa lignocelulósica tradicionales (Lisha, 2015).

Actualmente con el desarrollo de todas las tecnologías que van siendo más avanzadas, tanto en equipo como en infraestructura, la biomasa del nopal representa una fuente renovable de gran potencial, ya que puede obtenerse diversos biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser utilizados en autoconsumo como en la producción de calor, electricidad y combustibles para el transporte (Solís Segura, L. M. & López Arriaga, J. A. 2003).

Biocombustibles Potenciales del Nopal México cuenta con un potencial muy alto en materia de recursos energéticos

renovables, resultado de su gran diversidad agrícola y de sus condiciones climáticas y geográficas, cuyo desarrollo permitiría al país contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, tal y como se ejemplifica en este caso con el Nopal como se muestra en la tabla 1.

ESTADO México
 Ciclo: Cálculos y Perennes 2014
 Necesidad: Régimen Temporal
 Nopales

DISTRITO	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	PMK (\$/Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
1 Apatzingán	121.50	115.50	10,091.50	87.37	4,808.59	49,505.93
2 Costeños Nopales	58.00	53.00	2,029.00	38.11	2,997.92	5,995.84
3 Jilotepec	40.00	40.00	1,588.55	39.71	3,999.93	10,462.59
4 Texcoco	53.00	53.00	929.00	17.34	610.39	640.29
5 Toluca	20.00	20.00	1,031.00	51.55	4,589.59	4,725.68
6 Valle de Bravo	28.00	19.00	559.00	29.42	1,900.00	1,962.10
7 Zumpango	570.00	570.00	34,909.67	113.99	1,995.99	35,293.94
	892.50	870.50	61,093.52	53.16	1,637.57	136,161.17

Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación

Tabla 1. Municipios con mayor producción de nopal (Opuntia) en el estado de México

El etanol (C₂H₅-OH), también conocido como alcohol etílico, se obtiene a partir de tres tipos de materia prima: los productos ricos en sacarosa (caña de azúcar, la melaza y el sorgo dulce, etc.); las fuentes ricas en almidón cereales (maíz, trigo, cebada, etc.) y tubérculos (yuca, camote, papa, etc.); y mediante la hidrólisis de los materiales ricos en celulosa como la madera y los residuos agrícolas. El etanol es un líquido inflamable, incoloro y es el alcohol de menor toxicidad. Posee un alto octanaje y una mayor solubilidad en gasolina que el metanol (Bravo, 2008).

Pocos son los estudios relacionados sobre la utilización del nopal con fines de obtención de bioetanol, ya que como lo señala Varnero y García de Cortázar (2006) la tecnología de producción de etanol es más compleja que la producción de biogás. El proceso de fermentación alcohólica, debe ser seguido por una destilación para obtener el combustible; además, de la necesidad de disponer de levaduras específicas para maximizar la producción de etanol.

Uno de los estudios más interesantes fue realizado por Retamal et al., (1987) al someter a fermentación cladosios de nopal mediante una hidrólisis ácida (1 N HCl, 100 °C, 30 min) y enzimática (células 47 °C, 4 h, pH 4.5) y utilizando *Saccharomyces sp.* Se produjeron 8,6 L de 100 kg cladosios por lo que no se considera competitivo en relación a las frutas fermentadas. Con una densidad de 635-5000 plantas por hectárea, se podría obtener una media de entre 300 y 3000 L de etanol en plantaciones no regadas y con riego, respectivamente. Cabe destacar que ante la reciente escalada de los precios internacionales del petróleo y ante la inminente reducción de los subsidios en nuestro país a las gasolinas, la alternativa de generar etanol a partir de los cladosios o bien de los azúcares presentes en la tuna podrían en un futuro cercano ser una realidad, no sin antes verificar el balance energético de dichas opciones.

Descripción del Método

El interés del presente trabajo se enmarca en el creciente desarrollo de la tuna con un proceso que consta de las siguientes etapas:

Triturado, hidrólisis, concentrado, ajuste de pH, fermentación, destilación, prensado de vinazas y combustión de la fracción sólida de las mismas como lo describe la figura 1 bajo la revisión de la literatura se parte del trabajo de Sánchez 2012. Para asegurar la viabilidad económica el proceso debe utilizar tecnologías hidrolíticas alternativas, podrían consistir en el empleo de enzimas.

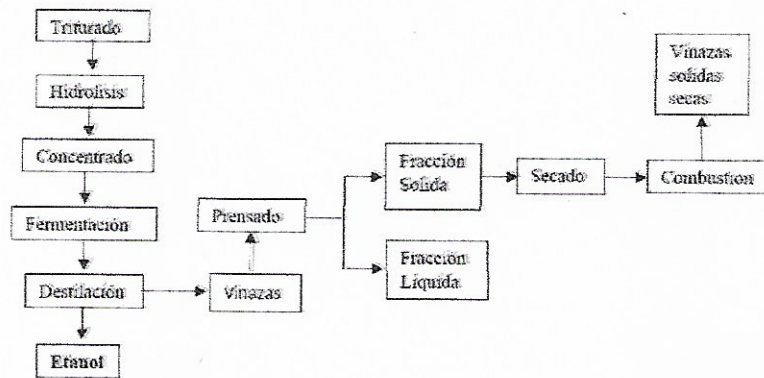


Fig. 1 Etapas del proceso de obtención de etanol. (Fuente Sánchez 2012)

Dentro de os etapas se tiene la de triturado esta se realiza con una trituradora de frutas con una capacidad de trabajo de aproximadamente 2.500 kgh^{-1} Posteriormente se vierte en un reactor adiabático que está aislado con espuma de poliuretano de 150 mmm de espesor para la hidrolisis que se realiza, en H_2SO_4 a una temperatura de 120°C .Seguido de esto se concentra el producto después de la fermentación se lleva a cabo en un reactor de 500m^3 La fermentación se da de manera exotérmica que libera 23,5 Kcal por cada mol de hexosas la cantidad de sustrato 324 kg y se ha llevado a cabo la trasformación del 77.7 % etanol y este es destilado. Se prensa el hidrolizado por un filtro prensa donde se separa la fase solida de la fase liquida cuya cantidad de materia seca es del 75% que es la vinaza sólida. Esta vinaza solida están constituida de fracción fibrosa de la biomasa del nopal, con un 25 % de humedad aproximada es secada al sol.

Comentarios Finales

Resumen de resultados

Cada microdestilería seria provista de biomasa procedente de 2,00 ha ($10,103 \text{ TMSaño}^{-1}$, considerando y rendimiento promedio de cultivo de $5 \text{ tMSha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ el municipio de Zumpango es factible bajo esta primicia de establecer una planta-micodestilería de bioetanol ya que cuenta con la suficiente materia prima para su funcionamiento.

El municipio se Zumpango tiene una producción a partir de la cantidad de biomasa estimada con un porcentaje del 32.4% de hidratos de carbono fácilmente hidrolizable y un rendimiento de fermentación de 39.7% se obtendrían 64.710 t de etanol (99.9%) equivalente a 82.158 m^3 de bioetanol anhidro comercial con una pureza del 99.6%.

A nivel industrial y en términos cuantitativos, la fabricación de bioetanol se establece que sea a través de microdestilerías con una producción en torno a 100.000Ldia^{-1} b con un volumen diario de producto en aproximado a los $5,000\text{L}$.

Conclusiones

El proceso de obtención de bioetanol se puede llevar a cobo en una microdestilería en el Municipio de Zumpango que es la zona que se propone como sitio de estudio de acuerdo a las estadísticas de producción de nopal (*opuntia ficus*) cladodios y su fruto (tuna) con un volumen diario de producto en torno al os 5.000L . Esta instalación requeriría de 235.5 t de biomasa fresca al día $77.719 \text{ t año}^{-1}$. Abastecida por una superficie de cultivo de 2.021 ha que produjeran con forme a un rendimiento de $5\text{t MSha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

El volumen de bioetanol de 99.6% obtenido mediante este proceso a partir de una tonelada de materia seca de tuna seria de 163.3 L

Referencias

- Altshuler, J. 2011. La energía y el hombre [Online]. Cuba. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia23/HTML/articulo09.htm> [Accessed 18 de octubre 2011]
- Bravo, E. 2008. Encendiendo el debate sobre los biocombustibles, cultivos energéticos y soberanía alimentaria en América Latina. Ed. Capital Intelectual S.A. HIVOS. Quito Ecuador, 135p
- Bravo H., H. 1978. Las Cactáceas de México. 2a. de. U.N.A.M. Vol. 1. México. 743 p
- Elizondo E., J. L.; J. J. López G.; J. Dueñez A. 1987. El Género *Opuntia* (Tournefort)Miller y su Distribución en el Estado de Coahuila. 2a.

García Tapia, N. & Carrillo Castillo, J. 2002. Tecnología e Imperio [Online]. Madrid: Nivola. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor [Accessed 13 de mayo 2011].

Instituto Interamericano De Cooperación Para La Agricultura (IICA). (2007) Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles?. IICA 24p

Lisha Yang, Mi Lu, Sarah Carl, Jesse A. Mayer, John C. Cushman, Elli Tian, Hongfei Lin, Biomass characterization of Agave and Opuntia as potencial biofuel feedstocks Biomass and Bioenergy Volumen 76, May 2015, pag. 43-53.

Méndez Gallegos S. de Jesus *et al.* 2010. VIII Simposium-Taller Nacional y 1erInternacional "Producción y Aprovechamiento de Nopal" RESPYN Revista Salud y Nutrición, Edición Especial No. 5-2010

Mendez, Martha, et al.,2016. Germinación y establecimiento de plántula. Boletín de la Sociedad Botánica de Mexico MexicoNo 079 pp 33-41 Distrito Federal Mexico.Redatyc

Retanal, N., Duran, J. M. & J. Fernández 1987 Ethanol producción by fermentation of frutis an cladodes of princkly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) Sci Food Agric 40, 2013-2018.

Solis Segura, L. M. & López Arriaga, J. A. 2003. Principios básicos de contaminación ambiental, México, UAEM.

Sanchez Godoy Francisco 2012 Potencial del cultivo de la chumbera (*Opuntia Ficus -indica*) para la obtención de biocombustibles Tesis Docotoral Universidad Politécnica de Madrid

Varnero, T.M. y V. García de Cortazar.2016. Producción de bioenergía y fertilizantes a partir de nopales In: Utilización agroindustrial de nopal. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 162. Pp113-120