

Bioetanol a partir del maguey (Agave americana) y su prospección en México

RESUMEN: En la actualidad existe preocupación por la generación de fuentes de energía renovables, unas de estas fuentes la constituyen bioetanol, lo que brinda una gran oportunidad para aumentar el sector agropecuario. Con la producción de etanol y su uso en mezcla con los combustibles fósiles, ha surgido la necesidad de cooperar en la detección de materia prima para su producción, que no sea la caña de azúcar y el maíz, ya que el precio de estos cultivos ha aumentado debido a la demanda para su utilización en la producción de etanol, cuando es más importante destinarlos al consumo alimenticio. Por lo anterior, este proyecto de investigación propone el uso del Maguey (*Agave americana*), como materia prima para la obtención de bioetanol, dando un alto potencial a los productos rurales en México. Además, este trabajo muestra una técnica calorimétrica para la caracterización energética del bioetanol generando un valor experimental de $-(23,473.74 \pm 25.51) \text{ Jg}^{-1}$ y un valor teórico de $-26,953.76 \text{ Jg}^{-1}$, para un bioetanol al 79.26% y 91% en volumen respectivamente. También se presenta una proyección para una demanda energía de bioetanol en mezcla E10 para el período 2015-2027 en México.

Palabras clave: bioetanol, agave americana, energía de combustión, mezcla E10, tierras áridas.



Colaboración

Diana Karen Lazcano Orozco, Universidad Mexiquense del Bicentenario; Aarón Rojas Aguilar, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados; Yesenia Núñez Galindo, Instituto Tecnológico de Orizaba; Alejandro Valdés Ordoñez, Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca

ABSTRACT: At present preoccupation by the generation of renewable energy sources exists, one of these sources constitutes it the bioethanol, which offers a great opportunity to increase the farming sector. With the ethanol production and its use in blend with fossil fuels, it has been given the necessity to cooperate in the detection of raw material for its production, except from cane sugar and maize, since the price of these crops has increased due to demand for its use in ethanol production, when it is more important its destine to the nutritional consumption. By the previous thing, this project of investigation proposes the use of the maguey (*Agave americana*), like raw for the production of bioethanol, giving a high potential to rural products in Mexico. In addition, this work shows a calorimetric technique for characterization energetic of bioethanol generating an experimental value from $-(23,473.74 \pm 25.51) \text{ Jg}^{-1}$ and a theoretical value from $-26,953.76 \text{ Jg}^{-1}$, for a bioethanol 79.26% and 91% by volume respectively. Projected energy demand for bioethanol in E10 blend to the period 2015-2027 in Mexico is also presented.

Keywords: bioethanol, agave americana, energy of combustion, E10 blend, drylands.

INTRODUCCIÓN

El problema energético que enfrentan varios países en el mundo, se debe principalmente a la creciente demanda de combustibles fósiles y al agotamiento de los yacimientos petroleros. México no queda exento de esta problemática, por lo que es necesario buscar nuevas alternativas que permitan obtener combustibles renovables y ecológicamente aceptables.

Los biocombustibles en la actualidad juegan un rol de suma importancia, aunque estos constituyen la primera fuente de energía que conoció la humanidad. Entre las fuentes para producir los biocombustibles, está la biomasa proveniente de cultivos como: caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca, en-

tre otros, la cual es usada para la obtención de etanol. El bioetanol como también se le suele nombrar, es un combustible de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos, al ser utilizado en la oxigenación de la gasolina, reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero en un orden del 20 al 60 por ciento en comparación con los combustibles fósiles; además, la emisión neta de CO₂ producida por la combustión del bioetanol es nuevamente fijada por la biomasa a través del proceso de fotosíntesis [1,2].

Actualmente, cerca del 85% de la producción mundial de biocombustibles líquidos está representada por el etanol. Los dos mayores productores de etanol con el 90% de la producción mundial, son Estados Unidos de América y Brasil, el resto de la producción se reparte entre Canadá, China y la Unión Europea [3].

En Estados Unidos de América, la producción de bioetanol se basa en el maíz (*Zea mays*), reportando una producción en el 2013 de 60,000 millones de litros, mientras que en Brasil la biomasa empleada es la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con una producción en el mismo período de 33,000 millones de litros. Pero en el caso del etanol extraído del maíz, durante su elaboración se está utilizando gas natural o carbón de origen mineral para su destilación, mientras que en el proceso de cultivo se usan fertilizantes nitrogenados, herbicidas de origen fósil y maquinaria agrícola, resultando en un balance energético donde cada unidad de energía utilizada por unidad de energía contenida en cada litro de alcohol obedece a una relación de 1:1.3. En el caso de la caña de azúcar, en muchos lugares se continua con la práctica de quemar la caña antes de la cosecha, lo que libera grandes cantidades de metano y óxido nitroso, dos gases que contribuyen de manera importante en el calentamiento global. Esta problemática se solucionaría mecanizando el proceso de cosecha, lo cual disminuiría el empleo rural, en este caso el balance energético requerido es de una relación de 1:8 [4,5].

En México, el etanol extraído del maíz y de la caña de azúcar, resulta no ser una solución a largo plazo, ya que ambos cultivos requieren de suelos agrícolas, un tema particularmente delicado por el alto índice de pobreza extrema y la deforestación de 260,000 hectáreas de bosque y/o selva al año. Además este país debe tener muy en claro que el maíz y la caña de azúcar es para el consumo de los mexicanos y no para el uso de sus autos.

Sin embargo a pesar de todo, México será otro país que transite en esa línea, cuando nuestros vehículos se desplacen con etanol en mezcla E10 (90% gasolina y 10% de etanol), por lo que resulta conveniente la propuesta de cultivos bioenergéticos con características diferentes a las descritas anteriormente, como lo es el Maguey (*Agave Americana*).

La presencia del maguey en México, se remonta a hace 10 mil años, tiempo en el que no ha recibido protección a pesar que ha dado alimento, bebida, techo, vestido, medicina y muchos otros beneficios de suma importancia, al mismo tiempo que ha sido testigo de nuestra historia y ocupa un lugar importante en las manifestaciones culturales de los mexicanos. El maguey “árbol de las maravillas” así lo escribió el jesuita José Acosta en 1590 en su *Historia Natural y Moral de las Indias* [6], por su aprovechamiento desde sus raíces hasta la punta de sus espinas, fue atacado durante la época colonial y actualmente es menospreciado y marginado. Sin embargo, países como Australia, han aprovechado la oportunidad que ofrecen estas especies y desde 2004 se encuentran importando varios tipos de *Agave* desde México [7].



Imagen 1. Maguey pulquero de la especie *Agave americana*.

La adaptación del Maguey en otros climas y suelos, es debido a las modificaciones morfológicas y fisiológicas que le permiten soportar las condiciones ambientales de los sitios que habitan, son plantas resistentes a terrenos áridos, donde no requiere de riego, por lo que con su capacidad de adaptación se podría utilizar y cultivar con notables ventajas en muchos de los terrenos que están abandonados en México y que se encuentran erosionados.

Ciertas especies de maguey como: *Agave salmiana*, *Agave americana*, *Agave atrovirens* y *Agave mapi-saga*, producen una savia azucarada conocida como aguamiel. El proceso de fermentación inicia en el propio maguey, donde se encuentran microorganismos autóctonos como un hongo levaduriforme perteneciente al género *Saccharomyces*, al igual que bacterias

del género *Zymomonas* y *Lactobacillus*, responsables de que el aguamiel se transforme, mediante una fermentación alcohólica, en una bebida llamada pulque. El tiempo de fermentación puede durar de 12 a 48 horas a temperatura ambiente, sin embargo el proceso se acelera por la adición de un inóculo iniciador llamado semilla (porción de pulque previamente producido). A medida que pasa el tiempo se presentan cambios importantes como un incremento en el porcentaje de etanol y formación de exopolisacáridos como β -glucanos y dextranos; que generan un incremento en la viscosidad [8-10]. Una característica química importante del pulque, es que presenta un contenido de etanol del 4-9 por ciento en volumen.

Una diferencia esencial entre el maíz y la caña de azúcar con respecto al maguey, es que en los primeros se necesita la adición de microorganismos para llevar a cabo el proceso de fermentación, así como el uso de centrifugas para una continua recirculación durante dicho proceso, lo cual requiere un valor energético estimado en (1,175.47 y 2,252.68) MJ/m³, respectivamente [11], eso sin tomar en cuenta el balance de energía que requieren el maíz y la caña de azúcar antes de llevar a cabo el proceso de fermentación. El proceso anterior a la fermentación se refiere al acondicionamiento, que consiste, en el caso del maíz, en lavado, molienda, precalentamiento, mezclado, prelicuefacción, calentamiento y licuefacción, y para la caña de azúcar en lavado, molienda y clarificación, donde su consumo energético es estimado en (395.23 y 3,344.73) MJ/m³, respectivamente. Esto resulta una gran ventaja para el maguey, ya que esta energía es nula.

Actualmente los estados productores de pulque son principalmente Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México, Puebla y Aguascalientes, aunque también se le encuentra marginalmente en Coahuila, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí, Veracruz y Oaxaca. En la tabla 1 se muestra la producción de maguey pulquero reportado para el año 2013, por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de México [12].

Tabla 1. Producción de maguey pulquero en el 2013.

Estado	A _{Semb.} Ha	A _{Cos.} Ha	Producción Anual en L
Aguascalientes	50.00	50.00	5,355,000
Coahuila	1,838.00	0.00	0
Guanajuato	2.50	2.50	57,500
Guerrero	4.00	4.00	22,000
Hidalgo	5,613.00	3,681.50	437,210,620
Jalisco	3.00	0.00	0
México	1,414.00	236.88	3,123,000
Michoacán	7.05	0.00	0
Puebla	139.00	139.00	5,828,000
Querétaro	89.00	0.00	0
San Luis potosí	20.00	20.00	103,000
Tlaxcala	668.00	668.00	5,198,7000
Veracruz	107.00	85.00	680,000
Total	9,954.55	4,886.88	504,366,120

A_{Semb.}, Superficie sembrada; A_{Cos.}, Superficie cosechada en hectáreas; L, Litros.

Tomando en cuenta cada uno de los puntos anteriores, este trabajo de investigación propone como un cultivo alternativo, para la obtención de bioetanol en México, al maguey de la especie *Agave americana*, que por las características que posee tiene un alto potencial bioenergético. Así mismo, el análisis calorimétrico realizado de energía de combustión permite potencializar este cultivo bioenergético. Por otro lado, se realiza una proyección dentro del mercado nacional para la demanda de gasolina con una mezcla E10, para el periodo 2015-2027 y la producción de etanol requerida para satisfacer dicha demanda.

MATERIAL Y MÉTODOS

Esta investigación fue desarrollada en cuatro etapas: proceso de fermentación, proceso de destilación, caracterización energética másica y prospectiva en México.

Proceso de fermentación

Para obtener bioetanol a partir del maguey, se obtuvo el aguamiel en la localidad de San Francisco Acuatla, municipio de Ixtapaluca, en el Estado de México. El aguamiel no se somete a un proceso de fermentación alcohólica como tal, ya que ésta se produce de manera natural en un tiempo de 48 horas obteniéndose como producto el pulque.

Proceso de destilación

Para obtener etanol a partir del pulque, se realizaron tres destilaciones simples. Para la primera destilación se utilizó una muestra de 4x10⁻⁴ m³ de pulque a temperatura de 364.15 K por 90 min; esto con la finalidad de garantizar la mayor cantidad de etanol hidratado, con el producto se derivó la cantidad de etanol a través de un alcoholímetro obteniendo 38°GL. Posteriormente la muestra fue sometida a una segunda destilación con un volumen de 1.5x10⁻⁴ m³ a temperatura de 353.15 K por un tiempo de 105 min., la cual se determinó un valor de 78°GL, finalmente la muestra de etanol aún hidratado se sometió a una tercera destilación con la finalidad de aumentar la pureza, a la temperatura de evaporización del etanol de 351.6 K por un tiempo de 120 min., obteniendo una muestra de etanol al 91° GL. En la tabla 2, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de fermentación y destilación para el bioetanol producido a partir de maguey.

Tabla 2. Resultados del proceso de fermentación.

Biomasa	V _{ferm} m ³	V _{bioetanol} m ³	R _{teórico} %
Maguey	57.5x10 ⁻⁴	4.225x10 ⁻⁴	7.348

V_{ferm}, volumen de fermentado; V_{bioetanol}, volumen de bioetanol; R_{teórico}, rendimiento teórico.

Caracterización energética

Para la determinación de la energía de combustión se utilizó un calorímetro isoperibólico modelo Parr 1230 con una bomba estática modelo Parr 101A. Estas prue-

bas calorimétricas se realizaron en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Zacatenco en el Departamento de Química. La capacidad calorífica determinada para el sistema calorimétrico fue de $\epsilon_{cal} = (10,127.28 \pm 1.32) \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ a partir de 10 experimentos de combustión de ácido benzoico NIST 39j (National Institute of Standards and Technology). Una vez determinada la capacidad calorífica del sistema, se procedió a determinar la energía de combustión del bioetanol, los resultados de masa y energía de combustión de cada experimento se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Masa y energías de combustión del bioetanol.

Exp.	$m(\text{C}_2\text{H}_6\text{O})$ g	$m(\text{poliet.})$ g	$m(\text{alg.})$ g	ΔT_{corr} K	$-\Delta_c u^0(\text{C}_2\text{H}_6\text{O})$ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
<i>Bioetanol producido a partir del maguey</i>					
1	1.27122	0.15223	0.00261	3.64918	23,478.87
2	1.33380	0.14914	0.00220	3.78080	23,489.33
3	1.28336	0.17124	0.00228	3.76737	23,506.06
4	1.26408	0.19486	0.00208	3.83178	23,515.83
5	1.32875	0.17688	0.00236	3.89835	23,503.36
6	1.08562	0.19001	0.00213	3.37736	23,349.01

$$\langle -\Delta_c u^0 \rangle = (23,473.74 \pm 25.51) \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$$

$m(\text{C}_2\text{H}_6\text{O})$, masa del bioetanol empleada en cada experimento de combustión; $m(\text{poliet.})$, masa de la cápsula de polietileno empleado; $m(\text{alg.})$, masa de algodón utilizado como mecha; ΔT_{corr} , cambio de temperatura corregido registrado durante el proceso de combustión; $-\Delta_c u^0(\text{C}_2\text{H}_6\text{O})$, energía de combustión de cada experimento.

Por otro lado en la tabla 4, se muestran los valores promedio de energía de combustión y el porcentaje de hidratación, a partir de los valores experimentales reportados previamente por Valdés y col. [13,14], así como el cálculo teórico y experimental de la energía de combustión del etanol absoluto.

Tabla 4. Valores de energía de combustión del bioetanol producido de distintas biomazas y su porcentaje de Etanol.

Muestra	$-\Delta_c u^0(\text{C}_2\text{H}_6\text{O})$ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$-\Delta u$ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ %
Valor teórico	$-29,619.52 \pm 18.00$	0	100.00
Absoluto	$-29,497.16 \pm 22.54$	-122.36	99.59
Caña de Azúcar	$-24,373.69 \pm 16.34$	-5,245.83	82.29
Maguey (2ª destilación)	$-23,473.74 \pm 25.51$	-6,145.78	79.25
Maguey (3ª destilación)	$-26,953.76$	-2,665.76	91.00

$\Delta_c u^0(\text{C}_2\text{H}_6\text{O})$, energía de combustión promedio; $-\Delta u$, diferencia de energía; $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ %, porcentaje de bioetanol.

El valor obtenido de $\Delta_c u^0(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}) = -(23,473.74 \pm 25.51) \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, corresponde al bioetanol de maguey obtenido a través de dos destilaciones simples, mientras que el valor de $\Delta_c u^0(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}) = -26,953.76 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, se refiere al valor derivado de la medición de bioetanol con una tercera destilación simple, al cual se le determinó el contenido de etanol a través de un alcoholímetro con un resultado de 91º GL.

Prospectiva en México

Se realizó una investigación de la cantidad de gasolina que consume el país en un intervalo establecido, esto

con la finalidad de ver la tendencia y dependencia del consumo energético de este combustible fósil, dicha investigación se realizó a través del informe de la Secretaría de Energía (SENER, 2013) [15].

En la tabla 5, se muestra la producción y demanda de gasolina en México en el período 2002-2013, así como las crecientes importaciones de este petrolífero, observándose que en el 2013 la tasa de crecimiento anual fue de 42.46%, lo que corresponde a 336.5 miles de barriles diarios. También se observan las cantidades que se han utilizado de Metil Terbutil Éter (MTBE) y Teramil Metil Éter (TAME), principales componentes para la oxigenación de la gasolina en nuestro país, con un 10% del volumen empleado. Estos son los principales componentes a ser reemplazados con bioetanol.

Tabla 5. Producción, importación y demanda de gasolina en México 2002-2013.

Año	Prod. Mbd	Imp. Mbd	Demanda mbd	Demanda L/año	Demanda de MTBE y TAME L/año
2002	398.1	184.2	582.3	33,328,190,563	3,332,819,056
2003	444.9	141.1	586.0	33,539,961,652	3,353,996,165
2004	466.0	173.7	639.7	36,613,504,213	3,661,350,421
2005	439.5	231.8	671.3	38,422,143,783	3,842,214,378
2006	442.4	273.8	716.2	40,992,014,565	4,099,201,456
2007	443.8	309.8	753.6	43,132,619,626	4,313,261,963
2008	436.7	340.0	776.7	44,454,758,046	4,445,475,805
2009	455.3	329.1	784.4	44,895,470,853	4,489,547,085
2010	404.8	378.3	783.1	44,821,064,794	4,482,106,479
2011	388.8	404.7	793.5	45,416,313,261	4,541,631,326
2012	416.4	394.5	810.9	46,412,209,733	4,641,220,973
2013	456.0	336.5	792.5	45,359,078,117	4,535,907,783

Prod., producción; Imp., Importación; mbd, miles de barriles diarios; un barril equivale a 158.987304 litros, la demanda anual, está referido a 360 días lo que es igual a un año comercial; MTBE, Metil Terbutil Éter; TAME, Teramil Metil Éter.

En la tabla 6, se muestra una prospectiva de la producción, importación y demanda de la gasolina desde el 2014 hasta el 2027, donde se puede observar una dependencia que va del 39 al 50 por ciento de gasolina importada, razón de más para buscar nuevas alterna-

Tabla 6. Proyección de la producción, importación y demanda de gasolina en México 2014-2027.

Año	Producción mbd	Importación Mbd	Demanda mbd	Demanda L/año
2014	479.0	317.6	796.6	45,593,743,092
2015	507.0	336.1	843.1	48,255,190,561
2016	522.0	374.3	896.3	51,300,115,407
2017	510.0	464.4	974.4	55,770,202,446
2018	527.0	534.5	1,061.5	60,755,408,351
2019	531.0	607.2	1,138.2	65,145,365,789
2020	686.0	505.5	1,191.5	68,196,014,178
2021	732.0	506.3	1,238.3	70,874,632,276
2022	732.0	539.5	1,271.5	72,774,848,533
2023	733.0	579.4	1,312.4	75,115,777,597
2024	733.0	611.9	1,344.9	76,975,929,054
2025	729.0	648.5	1,377.5	78,841,804,054
2026	729.0	681.5	1,410.5	80,730,573,225
2027	726.0	717.3	1,443.3	82,607,895,311

mbd, miles de barriles diarios; un barril equivale a 158.987304 litros y la demanda anual, está referido a 360 días lo que es igual a un año comercial.

tivas para producir biocombustibles que satisfagan la demanda energética nacional.

Por otro lado, hablando de la extensión territorial, México cuenta con una superficie territorial de 1,964,375 km², del cual 1,959,248 km² son de superficie continental y 5,127 km² pertenecen a la superficie insular.

Las tierras que se propone para el cultivo del maguey con una alto potencial en México, serían las zonas secas, que comprende: suelos áridos, suelos semiáridos y suelos subhúmedos secos, en la tabla 7 se muestra el porcentaje de cada uno de ellos. Estos suelos se encuentran principalmente distribuidos en los desiertos sonorenses y chihuahuenses y en las regiones centrales influenciadas por el efecto de sombra orográfica generada por las sierras madre occidental y oriental. Con base en un estudio realizado por la Universidad Autónoma Chapingo (2011).

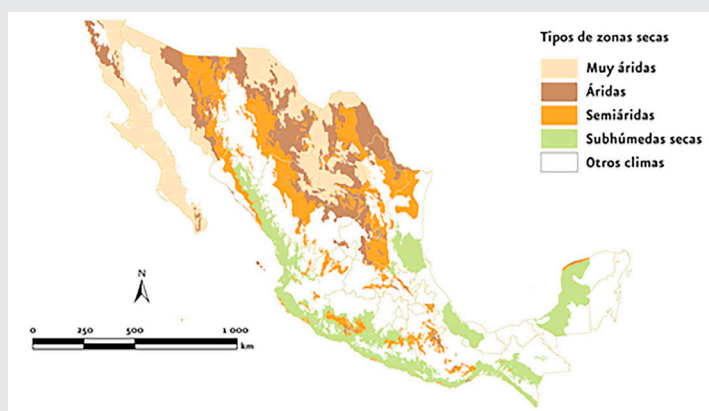


Imagen 2. Distribución de las zonas secas en México.

RESULTADOS

Con toda la información obtenida, podemos resaltar los siguientes puntos:

a) En el tabla 1, se reporta la superficie sembrada de maguey pulquero de 9,954.55 Ha, de la cual fue cosechada solo 4,886.88 Ha, con una producción de aguamiel de 504,366,120 litros. Si se estimara una producción de todas las hectáreas, la cantidad de aguamiel obtenida sería de 1,027,391,252 litros, esta cantidad sería la misma en pulque, de donde obtendríamos solo el 7.34% de etanol (tabla 2). Este valor equivaldría a 75,410,518 litros de etanol.

b) A partir de los datos de la tabla 6, se puede hacer una prospectiva de la demanda de bioetanol que equivale al 10% de la demanda de gasolina anual, este bioetanol será el sustituto del MTBE y TAME, para la oxigenación en una mezcla E10.

De acuerdo a la tabla 8, para el año 2027 se necesitarían 8,260,789,531 litros de etanol para satisfacer

la demanda del país en mezcla E10, sin embargo actualmente se obtendría 75,410,518 litros de etanol proveniente del maguey pulquero, lo que representa el 0.91% de la demanda nacional, en consecuencia no son suficientes las 9,954.55 hectáreas que son destinadas actualmente para el cultivo de maguey pulquero para satisfacer esta demanda.

Tabla 7. Porcentaje de zonas para su posible cultivo de agave.

Zonas	Superficie km ²	Porcentaje superficial %
Superficie continental	1,959,248	100
Áridas	159,355	8.13
Semiáridas	588,700	30.04
Subhúmedas secas	266,945	13.62

c) Si determinamos la cantidad de etanol por hectárea sembrada de maguey pulquero actualmente, obtendríamos un valor de 7,575.48 L/Ha. Para satisfacer la demanda de etanol hasta el 2027, sabemos que México cuenta con una superficie de suelos semiáridos de 588,700 km², lo que representa el 30.04% de la superficie continental de México reportado en tabla 7, suelo que puede ser utilizado para la siembra del maguey pulquero. Si se hace el cálculo con los valores de la superficie y la cantidad de etanol que se produce por hectárea, tal como se muestra en el tabla 9, sabremos que tan solo el 0.56% de la superficie de México sería suficiente para satisfacer la demanda de etanol del 2015 al 2027 producido a partir del maguey pulquero y utilizando suelos no agrícolas.

Como se observa en los resultados anteriores, la superficie del 0.56% del territorio nacional supera la demanda anual de etanol para el 2027 por 59,928,742.20 litros, quedando un excedente de etanol para su exportación.

Tabla 8. Proyección de la demanda de gasolina y etanol para la mezcla e10 en México 2015-2027.

Año	Demanda Mbd	Demanda L/año	Demanda de etanol para la mezcla E10 L/año
2015	843.1	48,255,190,561	4,825,519,056
2016	896.3	51,300,115,407	5,130,011,541
2017	974.4	55,770,202,446	5,577,020,245
2018	1,061.5	60,755,408,351	6,075,540,835
2019	1,138.2	65,145,365,789	6,514,536,579
2020	1,191.5	68,196,014,178	6,819,601,418
2021	1,238.3	70,874,632,276	7,087,463,228
2022	1,271.5	72,774,848,533	7,277,484,853
2023	1,312.4	75,115,777,597	7,511,577,760
2024	1,344.9	76,975,929,054	7,697,592,905
2025	1,377.5	78,841,804,054	7,884,180,405
2026	1,410.5	80,730,573,225	8,073,057,323
2027	1,443.3	82,607,895,311	8,260,789,531

mbd, miles de barriles diarios; un barril equivale a 158.987304 litros y la demanda anual, está referido a 360 días lo que es igual a un año comercial.

Estos resultados obtenidos desde el 2015 hasta el 2027, representan 13 años de prospectiva, tiempo suficiente para que el maguey pulquero crezca hasta su maduración que es de 8 a 12 años [17]. Por otro lado con 13 años de diferencia, se necesitaría 7.8% del territorio nacional equivale a una superficie de 142,633.25 km₂. Sabiendo que el maguey pulquero para su cultivo puede ocupar una longitud aproximada de 5 m por el crecimiento de su roseta, esto implica un área de 25 m₂ por maguey, por lo tanto en una hectárea (10,000 m₂) se podrían sembrar 400 magueyes. Lo cual equivaldría a sembrar 438,871,600 magueyes pulquero en una superficie de 0.56% del territorio de México considerando al suelo no agrícola (semiárido).

Tabla 9. Superficie nacional de suelos semiáridos para cubrir la demanda del 2027, con un volumen de 8,260,789,531 litros anuales.

Porcentaje en superficie nacional	Superficie Km ²	Cantidad de etanol L/año	Excedente de etanol L/año
1.00%	19,592.48	14,858,425,487.86	6,597,635,956.86
0.90%	17,633.23	13,372,582,939.08	5,111,793,408.09
0.80%	15,673.98	11,886,740,390.29	3,625,950,859.29
0.70%	13,714.74	10,400,897,841.51	2,140,108,310.51
0.60%	11,755.49	8,915,055,292.72	654,265,761.72
0.56%	10,971.79	8,320,718,273.20	59,928,742.20
0.50%	9,796.24	7,429,212,743.93	- 831,576,787.07

d) Por otro lado, el valor obtenido teóricamente de energía de combustión del etanol, a través de las entalpías de formación de la reacción ideal de combustión, como reportan Valdés y col. [13,14], genera un valor recomendado de -29,619.52 J·g⁻¹ para el etanol al 100%. Con este dato, se derivan las diferencias energéticas obtenidas del etanol absoluto y del etanol del maguey, que corresponden a (-122.36 y -6,145.78) J·g⁻¹, respectivamente, donde se obtiene que la pureza del etanol absoluto es 99.59% y para el bioetanol de maguey es de 79.26%, aplicando dos destilaciones simples para el caso del maguey. Con una tercera destilación se muestra un aumento en la pureza, siendo esta del 91%, lo que nos permite realizar el cálculo teórico obteniendo un valor de Δ_{c,u}°(C₂H₆O) = -26,953.76 J·g⁻¹, lo cual lleva a establecer que el bioetanol obtenido a partir del maguey requiere someterse a una destilación azeotrópica [18], antes de realizar pruebas donde se establezcan mezclas pertinentes con gasolina y calcular las eficiencias en motores de combustión interna.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en esta investigación, se puede establecer que el maguey de la especie Agave americana, es un cultivo que presenta un alto potencial para considerarse un cultivo bioenergético ecológicamente rentable, esto debido a que puede ser utilizado para la producción masiva de etanol, además que no compite con materias primas de origen alimentario, como el maíz y la caña de azúcar, los cuales son de suma importancia para la alimentación de los mexicanos. Adicionalmente los magueyes pulqueros, tienen una gran ventaja en el balance ener-

gético durante los proceso de extracción de etanol, ya que durante su acondicionamiento y fermentación el requerimiento en energía es nulo con respecto a otros cultivos bioenergéticos.

El utilizar una técnica calorimétrica para la caracterización energética del bioetanol, permite estimar la energía de combustión y derivar el porcentaje de hidratación de este biocombustible, datos que son de suma importancia debido a que con ellos se puede establecer la calidad del bioetanol extraído.

La proyección dentro del mercado nacional de la demanda de gasolina con una mezcla E10 para el período 2015 hasta el 2027, nos muestra que la tendencia de consumo va en aumento. Considerando que en la actualidad se encuentran sembradas aproximadamente 9,954.55 Ha de maguey pulquero, se estima que esto permitiría generar 75,410,518 litros de etanol, lo que representa sólo el 0.91% de la demanda nacional, por lo que no es suficiente para cubrir los requerimientos de producción de una mezcla E10. Sin embargo, de 1,959,248 km² de territorio continental de México, el 30.04% corresponde a zonas semiáridas, suelo que puede ser utilizado para la siembra del maguey. Para cubrir la demanda energética de etanol para los próximos años, se requerirá cultivar maguey pulquero de las especies: Agave salmiana, Agave americana, Agave atrovirens y Agave mapisaga, utilizando solamente el 0.56% anual del territorio nacional de suelos semiáridos por un período de 13 años, lo cual equivaldría a sembrar en una superficie total de 142,633.25 km².

Con la siembra de maguey pulquero, se promovería la creación de empleos permanentes y el desarrollo de la economía rural de forma directa, así como la expansión y explotación de la agricultura en tierras semiáridas, lo que sería una gran ventaja, debido a que la siembra de los magueyes recuperaría estos suelos en un futuro inmediato, y se podrían destinar a cultivos agroalimentarios sembrados de manera conjunta. Del mismo modo se fomentaría el desarrollo y la creación de tecnología nacional, así como la investigación científica en temas relacionados con el mejoramiento morfológico y fisiológico de los magueyes, lo cual tendría un impacto positivo en el medio ambiente local, nacional y global.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2008. *El Estado Mundial de la agricultura y la Alimentación*. Roma, Italia.

[2] Cardona, C.A., Sánchez, O.J., Montoya, M.I., Quintero, J.A. 2005. *Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz*. *Scientia et Technica*. 28: 187-192.

- [3] García, C.J.M, García, L.J.A. 2006. Biocarburantes Líquidos: Biodiésel y Bioetanol. Citme y CEIM, Madrid, España.
- [4] IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2007. Preguntas y Respuestas más Frecuente sobre Biocombustibles. San José, Costa Rica.
- [5] Da Silva, A.G. 2013. Impactos de los Biocombustibles: Experiencia Brasileña con etanol y el biodiesel. ENERGÍA ALTERNA Y BIOCOMBUSTIBLES Innovación e investigación para un desarrollo sustentable. Editado por Pérez, V. A. y García, P. E. Colegio de Postgraduados. México. 13-22.
- [6] Ramírez, J. 1995. Los magueyes, plantas de infinitos usos. CONABIO. Biodiversitas 3: 1-7.
- [7] Holtum, J.A.M., Chambers, D., Morgan T., Tan, D.K.Y. 2011. Agave as a biofuel feedstock in Australia. Bioenergy. 3: 58-67.
- [8] Escalante, A., Rodríguez, M.E., Martínez, A., López, A., Bolívar, F., Gosset G. 2004. Characterization of bacterial diversity in Pulque, a traditional Mexican alcoholic fermented beverage, as determined by 16S rDNA analysis. FEMS Microbiology Letters. 235: 273-279.
- [9] Cervantes, M., Pedroza, A.M. 2007. El pulque: Características Microbiológicas y Contenido Alcohólico Mediante Espectro Ramán. Publicación Científica en Ciencias Biomédicas. 8(5): 135-146.
- [10] Nobel, P. S. 1998. Los Incomparables Agaves y Cactus. Editorial Trillas. México.
- [11] Cardona, C.A., Sánchez, O.J., Montoya, M.I., Quintero, J. A. Simulación de los Procesos de Obtención de Etanol a partir de Caña de Azúcar y Maíz. 2005. Scientia et Technica Año XI. 28: 187-192.
- [12] SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2013. Cierre de la producción agrícola por cultivo 2013. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap/icultivo/index.jsp
- [13] Ibarra, A.M., Mendoza, V.A.M.A., García, C.O., Núñez, G.Y., Ruelas, S.P.U., Rojas, A.A., Valdés, O.A. 2013. Energía de combustión del Bioetanol Producido a partir de maguey (Agave americana), naranja (Citrus sinensis) y palma de coyol redondo (Acrocomia mexicana). ENERGÍA ALTERNA Y BIOCOMBUSTIBLES Innovación e investigación para un desarrollo sustentable. Editado por Pérez, V. A. y García, P. E. Colegio de Postgraduados. México. 67-76.
- [14] Lazcano, O.D.K., Rojas, A. A., Núñez, G.Y., Valdés, O.A. 2014. Energía de combustión del Bioetanol Producido a partir de maguey (Agave americana), naranja (Citrus sinensis) y palma de coyol redondo (Acrocomia mexicana). XI Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2014. Cuernavaca, Morelos, México.
- [15] SENER (Secretaría de Energía). 2013. Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2013-2027.
- [16] FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2009. LA FAO EN MÉXICO, Más de 60 años de cooperación 1945-2009. México, México.
- [17] Manrique-Dorronsoro, R. 2013. Caracterización y conservación de inóculos tradicionales para la producción de pulque. Tesis de grado. Licenciatura en Química de Alimentos. Facultad de Química. Universidad Autónoma Nacional de México. México.
- [18] Chang, R. 2008. Fisicoquímica para las ciencias químicas y biológicas. Ed. McGraw-Hill Interamericana. México. 255-256.