

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Extracción de aceite vegetal de semillas oleaginosas de Baja California. Caso de estudio: Higuera y Algodón”

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA

DANIELA GUADALUPE LUCÍA MONTES NÚÑEZ

DIRECTOR DE TESIS

DRA. GISELA MONTERO ALPÍREZ

CO-DIRECTOR DE TESIS

DR. CONRADO GARCÍA GONZÁLEZ

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente gracias a Dios y a mi hijo José Guillermo, por darme las fuerzas para seguir adelante.

A mi padre, Guillermo Montes, que a pesar de no haber estado conmigo físicamente, su consejo de nunca rendirme, hoy está dando frutos.

A mi madre, Guillermina Núñez, por su incondicional apoyo en todos los aspectos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo financiero brindado a través de la beca de estudios que me fue otorgada durante el periodo del posgrado.

Al Instituto de Ingeniería por todas las facilidades brindadas.

A mis compañeros, Marcos Coronado, Lydia Toscano, Laura Pérez, Armando Pérez, Ana Vázquez, Ramón Ayala y Ángel Valdez por toda la ayuda que me brindaron, pero sobre todo por su amistad.

Al Dr. Conrado García, mi co-director de tesis, por su apoyo y amistad incondicional que siempre me brindo y, por último, pero no menos importante, a mi directora de tesis, la Dra. Gisela Montero Alpírez, quien fue pieza fundamental para el desarrollo de este trabajo, que a pesar de estar siempre ocupada, se dio tiempo para atender mis dudas y escucharme con paciencia y buena disposición, en verdad muchas gracias.

## ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS.....	v
LISTADO DE TABLAS.....	v
Resumen.....	vi
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Hipótesis.....	3
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Aceite vegetal.....	5
2.1.1 Estructura química de los triglicéridos.....	6
2.1.2 Ácidos grasos más comunes presentes en los aceites vegetales.....	7
2.2 Aceite de algodón.....	8
2.3 Aceite de higuera.....	9
2.4 Procesos de extracción de aceite vegetal.....	10
<b>3 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>12</b>
3.1 Desarrollo de la extracción de aceite vegetal.....	12
3.1.1 Extracción mecánica de aceite de semilla de algodón.....	12
3.1.1.1 Diseño de experimentos .....	12
3.1.1.2 Preparación de las muestras.....	14
3.1.1.3 Prensado mecánico.....	15
3.1.2 Extracción mecánica de aceite de semilla de higuera.....	17
3.1.2.1 Diseño de experimentos .....	17

3.1.2.2 Preparación de las muestras.....	18
3.1.2.3 Prensado mecánico.....	18
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>21</b>
4.1 Resultados del diseño de experimentos de extracción de aceite de algodón.....	21
4.1.1 Análisis estadístico del diseño de experimentos.....	22
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>26</b>
5.1 Conclusiones.....	26
5.2 Recomendaciones.....	26
<b>6 REFERENCIAS.....</b>	<b>29</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>28</b>
Propuesta de aprovechamiento de la semilla de algodón en Baja California.....	29
Biomasa residual, opción energética para Baja California.....	35
Estimación del potencial energético de la biomasa residual de algodón ( <i>Gossypium Hirsutum</i> ) en Baja California.....	41
Impacto en consumo y propuesta de tratamiento del agua en el proceso de purificación del biodiesel en Baja California, México.....	48

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del ácido ricinoleico (C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>3</sub> ).....	5
Figura 2. Reacción de transesterificación.....	6
Figura 3. Triglicérido.....	6
Figura 4. Ácido graso libre.....	7
Figura 5. Prensa utilizada para la extracción de aceite de semilla.....	12
Figura 6. Desborre de semilla de algodón.....	14
Figura 7. Neutralización de semilla de algodón.....	15
Figura 8. Secado de semilla de algodón.....	15
Figura 9. Extracción mecánica de aceite de semilla de algodón.....	16
Figura 10. Muestra de aceite y torta resultante de la extracción.....	16
Figura 11. Semilla de higuera con cáscara.....	18
Figura 12. Gráficas de residuos para la variable de respuesta.....	23

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Ácidos grasos más comunes.....	7
Tabla 2. Composición de varios aceites y grasas.....	8
Tabla 3. Composición de aceite de algodón.....	9
Tabla 4. Composición de aceite de higuera.....	9
Tabla 5. Arreglo de factores para el diseño de experimentos (algodón).....	13
Tabla 6. Arreglo de factores para el diseño de experimentos (higuera).....	17
Tabla 7. Corridas preliminares al diseño de experimentos.....	19
Tabla 8. Resultados de las extracciones de aceite de algodón.....	21
Tabla 9. Resultados estadísticos de extracciones.....	22

## Resumen

Baja California cuenta con 431,600 hectáreas cultivables, de los cuales el Valle de Mexicali tiene una superficie bruta de 207,000 hectáreas. Los suelos predominantes en el Valle de Mexicali son los característicos de zonas áridas y semiáridas, pobres en materia orgánica, con los cuales con agua de riego y fertilización adecuada son capaces de elevada producción agrícola. Así, solo el 62% de la superficie del valle es susceptible de explotación agrícola.

Las plantas oleaginosas constituyen uno de los grandes grupos de cultivos de mayor producción, investigación, experimentación y comercialización a nivel mundial; precisamente por ser plantas cuyas semillas, granos o frutos tienen un alto porcentaje de ácidos grasos y proteínas de alta calidad. En Baja California, los cultivos característicos son trigo grano, alfalfa verde y cebada, entre los cuales se encuentran las plantas oleaginosas predominantes en la región como cártamo, aceituna, algodón y recientemente integrada la higuera.

Existe una gran variedad de oleaginosas que se utilizan de diversas maneras. Sin embargo, se aprovechan mayormente en la obtención de aceites y grasas vegetales para cocinar. Gracias a tecnologías innovadoras, se han creado productos y mercados para muchos subproductos comestibles y no comestibles como son compuestos de uso farmacéutico, jabones, agroquímicos, barnices, plásticos y biocombustibles para automotores como el biodiesel.

Comúnmente, la extracción de aceites y grasas vegetales se puede realizar mediante dos métodos de obtención. Uno de ellos es por extracción mecánica, en el cual, las semillas y/o frutos oleaginosos se someten a un proceso de prensado, finalmente, el aceite obtenido pasa a un proceso de refinamiento. Los residuos de este prensado se aprovechan como alimento para el ganado, por ser un producto muy rico en proteínas, sin embargo tal proceso de extracción es el que tiene menores rendimientos. El segundo método consiste en un proceso químico donde se utilizan solventes químicos, siendo el hexano el más utilizado, siendo este el más inofensivo para la salud y el que produce aceite más puro. Este proceso se caracteriza por su gran rendimiento y su poco empleo de mano de obra.

En esta investigación se plantea entonces, la caracterización y obtención de aceite de semillas de plantas oleaginosas de Baja California por extracción mecánica. Para ello, se determinarán las condiciones más adecuadas para la obtención del mismo, variando temperatura, velocidad y tamaño de boquilla de la prensa. Se pretende que este proyecto sirva como base para obtener información confiable de las condiciones más adecuadas para la obtención de aceite vegetal.

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Planteamiento del problema**

Baja California es un estado donde se cultivan gran variedad de oleaginosas comestibles y otras variedades no aptas para consumo humano. Actualmente, la información de estos cultivos son referidos, por lo general, a datos agronómicos, sin embargo, se necesita información sobre las condiciones más adecuadas para un mejor rendimiento y aprovechamiento en la extracción y obtención de aceites de semillas oleaginosas de Baja California, tales como la higuera, la jatropha y algodón hueso. El aprovechamiento de estos cultivos resulta de gran importancia tanto para la planificación de otros recursos energéticos en el estado, así como desde el punto de vista alimenticio.

Es por ello, que surge la necesidad de determinar las condiciones más adecuadas para la obtención de aceite de dichas oleaginosas, mediante prensado mecánico, variando las condiciones de trabajo (temperatura, rpm y presión).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar las condiciones de operación de una prensa mecánica en la extracción de aceite, para obtener el mayor rendimiento posible, de algunas variedades de semillas de higuera y algodón hueso.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar las condiciones óptimas de operación en las cuales las semillas presenten un mayor rendimiento, variando temperatura, tamaño de boquilla y rpm de la prensa.
- Determinar las cantidades de aceite obtenido y de residuo mediante prensado mecánico.
- Proporcionar información confiable respecto a las condiciones óptimas de operación.
- Estimar el potencial energético de estos cultivos en Baja California.

### **1.3 Hipótesis**

Mediante la variación de las condiciones de temperatura, tamaño de boquilla y rpm de una prensa mecánica, será posible determinar las condiciones más adecuadas para obtener el mayor rendimiento y aprovechamiento de las semillas oleaginosas a procesar.

## Capítulo 2

### MARCO TEÓRICO

## 2. MARCO TEÓRICO

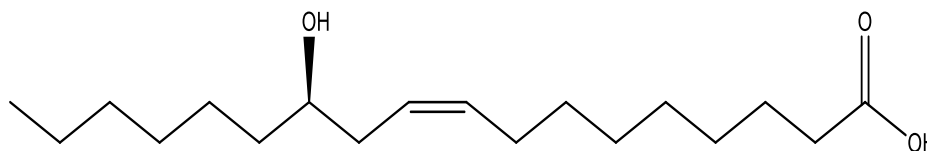
En la búsqueda de nuevas fuentes renovables de energía, una opción son los cultivos oleaginosos. Las plantas oleaginosas constituyen uno de los grandes grupos de cultivos de mayor producción, investigación, experimentación y comercialización mundial. Son muy valiosas para el ser humano y se distinguen del resto de las plantas comestibles porque sus frutos y semillas contienen un alto porcentaje de ácidos grasos o aceites comestibles, indispensables para la nutrición del ser humano, así como proteínas de alta calidad con las cuales se fabrican pastas que se utilizan en la alimentación animal.

Dentro de las oleaginosas, se encuentran variedades no aptas para la alimentación del ser humano, como la higuera (*Ricinus Communis*) y la *Jatropha Curcas*, cuyo alto contenido de aceite conlleva un elevado contenido energético, que resulta sumamente atractivo como materia prima para la elaboración de biocombustibles y que se pudiesen cultivar en Baja California. La higuera, crece en el Valle de Mexicali, en tanto que la *Jatropha Curcas* se adaptó a las condiciones climáticas de la zona costa del Estado.

Otro cultivo oleaginoso que se siembra en grandes cantidades en el Valle de Mexicali, es el algodón hueso. El aceite extraído de este cultivo se utiliza principalmente en la producción de alimentos.

### 2.1 Aceite Vegetal

Los aceites vegetales son mezclas de triglicéridos de diferentes ácidos grasos. La proporción de estos ácidos grasos y sus características son los que otorgan diferentes propiedades a los aceites vegetales. Un ejemplo de estos ácidos se muestra en la Figura 1, el ácido ricinoleico, principal constituyente del aceite de higuera.



**Figura 1.** Estructura del ácido ricinoleico ( $C_{18}H_{34}O_3$ )  
Fuente: Elaboración propia [1]

La composición química de los aceites vegetales varía de acuerdo al tipo de semilla de la que fue extraído, así como también de las condiciones climatológicas en las que estas semillas fueron plantadas.

Los aceites vegetales obtenidos de las semillas y granos de las plantas oleaginosas tienen diversos usos, la mayor parte se usan para alimentar el ganado, otros para consumo humano y como combustibles para los motores diesel, como el biodiesel, que se obtiene convirtiendo los triglicéridos en ésteres de metilo o etilo, a través de un proceso denominado transesterificación.

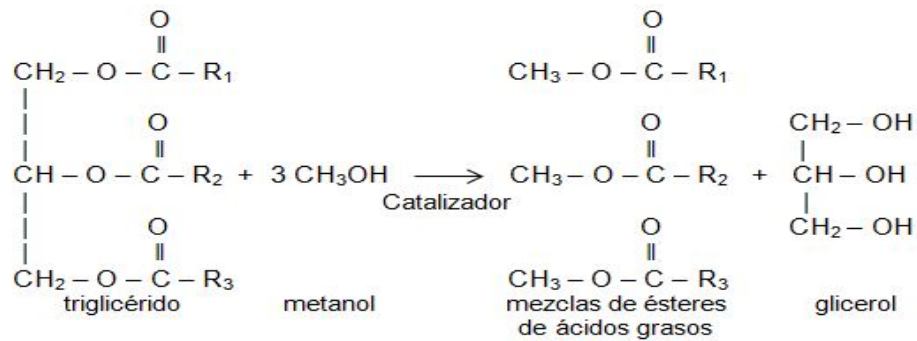


Figura 2. Reacción de transesterificación [2]

### 2.1.1 Estructura química de los triglicéridos

Los triglicéridos son los componentes principales de los aceites vegetales y las grasas animales, pueden ser sólidos (grasas) o líquidos (aceites) a temperatura ambiente. Un triglicérido consiste en tres ácidos grasos y una molécula de glicerol, tal como se muestra esquemáticamente a continuación [2].

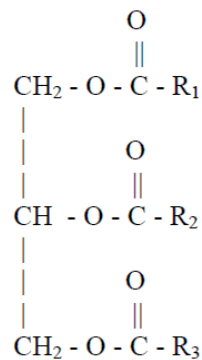
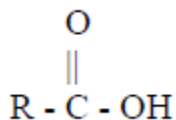


Figura 3. Triglicérido

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> y R<sub>3</sub> representan las cadenas de hidrocarburos de los grupos de ácidos grasos de los triglicéridos. En su forma libre, los ácidos grasos tienen la configuración que se muestra en la Figura 4, en la que R es una cadena hidrocarbonada ≥ 10 átomos de carbono [2].



**Figura 4.** Ácido graso en forma libre

### 2.1.2 Ácidos grasos más comunes presentes en los aceites vegetales

Los ácidos grasos más abundantes presentan cadenas lineales con un número par de átomos de carbono. Son designados por dos números, el primero denota el número total de átomos de carbono en la cadena del ácido graso y el segundo es el número de las dobles ligaduras presentes en la cadena [3]. En la Tabla 1 se enlistan los ácidos grasos más comunes presentes en algunos aceites vegetales y grasas animales comunes.

**Tabla 1.** Ácidos grasos más comunes

Estructura	Nombre común
14:0	Ácido Mirístico
16:0	Ácido Palmítico
18:0	Ácido Esteárico
18:1	Ácido Oleico
18:2	Ácido Linoleico
18:3	Ácido Linolénico

Visto lo anterior, la Tabla 2 nos muestra los porcentajes de cada ácido graso presente en la composición de varios aceites vegetales y grasas.

**Tabla 2.** Composición de varios aceites y grasas. [3] [4]

Grasa o aceite	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3
Soya		6-10	2-5	20-30	50-60	5-11
Maíz	1-2	8-12	2-5	19-49	34-62	
Higuerilla*		1.1	3.1	4.9, 89.6 <sup>a</sup>	1.3	
Cacahuete		8-9	2-3	50-65	20-30	
Oliva		9-10	2-3	73-84	10-12	
Semilla de algodón	0-2	20-25	1-2	23-25	40-50	
Mantequilla	7-10	24-26	10-13	28-31	1-2.5	0.2-0.5
Manteca de cerdo	1-2	28-30	12-18	40-50	7-13	0-1
Sebo	3-6	24-32	20-25	37-43	2-3	
Aceite de linaza		4-7	2-4	25-40	35-40	25-60

<sup>a</sup> Ácido Ricinoleico

## 2.2 Aceite de algodón

El aceite de algodón es un aceite de mesa, subproducto de la industria del algodón, es rico en ácidos grasos poliinsaturados y no contiene colesterol, por lo que una vez refinado y desodorizado se ocupa como uno de los aceites comestibles más puros de cocina. La semilla de algodón es la segunda fuente mundial de proteína vegetal, por lo que es altamente aprovechada para la producción pecuaria [5]. La harina que resulta después de extraer el aceite, se transforma en forraje destinado a la alimentación de los rumiantes [6].

Del 100% del algodón hueso que se obtiene, 35% corresponde a la fibra, 55% a la semilla y 10% a la merma [6]. Los ácidos grasos presentes en el aceite de semilla de algodón se muestran en la Tabla 3 [7].

**Tabla 3.** Composición de aceite de algodón

<b>Ácido graso</b>	<b>Contenido (%)</b>
Ácido Linoleico	55
Ácido Palmítico	24.4
Ácido Oleico	17.2
Ácido Esteárico	2.2
Ácido Mirístico	0.8
Ácido Palmitoleico	0.4

### 2.3 Aceite de higuera (*Ricinus Communis*)

El aceite de higuera, también llamado aceite de ricino o de castor se extrae de las semillas de la higuera (*Ricinus Communis*). Su principal componente es el ácido ricinoleico, cuya concentración en porcentaje por peso es cercana al 90%. Dada su naturaleza química, el aceite de higuera es altamente viscoso, miscible en alcohol y ácido acético y de bajo punto de solidificación [8]. El enlace insaturado, su alto peso molecular (298), su bajo punto de fusión (5°C) y su bajo punto de solidificación (-12°C a -18°C) hace que sea industrialmente útil, sobre todo por tener una viscosidad alta y estable sobre cualquier otro aceite vegetal [9]. En la Tabla 4 se detalla la composición química del aceite de higuera [10].

**Tabla 4.** Composición de aceite de higuera

<b>Ácido graso</b>	<b>Contenido (%)</b>
Ácido Ricinoleico	90.2
Ácido Linoleico	4.4
Ácido Oleico	2.8
Ácido Esteárico	0.9
Ácido Palmítico	0.7
Ácido Dihidroxiesteárico	0.5
Ácido Licosanoico	0.3
Ácido Linolénico	0.2

La higuera representa uno de los cultivos con gran potencial para ser utilizado como materia prima en la obtención de biodiesel, esto debido a que el aceite de higuera tiene asociado un poder calorífico inferior de 35.49 MJ/kg [4], sin embargo, el cultivo de la higuera en México, es aún incipiente.

#### **2.4 Procesos de extracción de aceite vegetal**

El proceso de obtención del aceite vegetal a partir de una oleaginosa puede realizarse por varios métodos, los más comunes es por extracción con solventes y por prensado. La extracción mediante solventes, es un método opuesto al mecánico. Las semillas son trituradas, posteriormente se homogeniza y se somete a la acción de un disolvente, siendo el hexano el más utilizado en la actualidad. El disolvente arrastra las grasas a un evaporador donde son separadas, la torta resultante se lleva a un separador para eliminar el resto del disolvente.

La extracción mecánica consiste en la molienda de las semillas. Las semillas son trituradas en una prensa de tornillo, esto con la finalidad de colapsar su estructura y así el aceite sea liberado con más facilidad. El aceite se exprime de la semilla en un solo paso, bajo alta presión y temperatura.

En el desarrollo del presente trabajo, se utilizó la extracción mecánica como método para la obtención del aceite, debido a que no requiere el uso de solventes, por lo que no se contamina el aceite vegetal obtenido, así como el ahorro en costos por el no manejo de solventes y el bajo costo en mantenimiento del equipo.

## Capítulo 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Desarrollo de la extracción de aceite vegetal**

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó el método de extracción de prensado mecánico, esto debido a que ya se contaba el equipo con el cual se trabajaría, disminuyendo el costo en la realización del proyecto.

Para la extracción de los aceites se utilizó una prensa de extracción mecánica KOMET – CA59G, la cual tiene una capacidad de procesamiento de 1.5 kg/h, con rangos de temperatura de operación de 25°C a 140°C, velocidad de procesamiento de 1 a 10, con boquillas de presión de 4, 5, 6, 8 y 10 mm.



**Figura 5.** Prensa utilizada para la extracción de aceite de semillas

#### **3.1.1 Extracción mecánica de aceite de semilla de algodón**

##### **3.1.1.1 Diseño de experimentos**

El diseño de experimentos que se eligió para este trabajo es un diseño factorial. Este tipo de diseño nos permite detectar interacciones entre factores, en el que todos los niveles de un factor se combinan con todos los niveles de otro factor. Entre las ventajas del diseño factorial se pueden enunciar las siguientes:

- a) Proporciona mayor información con menos lecturas
- b) Permite detectar interacciones
- c) Permite obtener conclusiones consistentes

En la Tabla 5 se muestra el diseño factorial para la extracción, considerando las variantes de la prensa mecánica con la que se trabajó.

**Tabla 5.** Arreglo de factores para el diseño de experimentos

<b>Diseño Factorial</b>				
	<b>T1</b>		<b>T2</b>	
	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>
<b>V1</b>	M1, M2, M3	M4, M5, M6	M7, M8, M9	M10, M11, M12
<b>V2</b>	M13, M14, M15	M16, M17, M18	M19, M20, M21	M22, M23, M24

Donde:

T1: Temperatura 70°C

T2: Temperatura 90°C

B1: Boquilla #6

B2: Boquilla #8

V1: Velocidad 1

V2: Velocidad 2

M: Número de muestra (muestras de 300 g)

Como variable de respuesta tenemos la cantidad de aceite de semilla de algodón obtenido. La significancia fue del 95% ( $\alpha=0.05$ ). El diseño factorial fue de  $2 \times 2 \times 2$  con tres réplicas cada uno de los tratamientos, resultando en un número total de observaciones de 24. La hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ) son las que se muestran a continuación:

$H_0 = \text{Temperatura} = 0$

$H_1 = \text{Temperatura} \neq 0$

$H_0 = \text{Boquilla} = 0$

$H_1 = \text{Boquilla} \neq 0$

$H_0 = \text{Velocidad} = 0$

$H_1 = \text{Velocidad} \neq 0$

En donde, si la condición es igual a cero, significa que ese factor no presenta efecto sobre la variable de respuesta. En caso contrario, significa que si presenta una afectación.

Es importante mencionar que para la determinación de estas condiciones, se realizaron pruebas preliminares, con la finalidad de trabajar bajo las variables más significativas del proceso.

### 3.1.1.2 Preparación de la muestra

Antes de iniciar con el proceso de extracción, las semillas de algodón pasaron por un proceso de desborre químico. El desborre químico consistió en someter a las semillas a un tratamiento de una mezcla de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y agua ( $H_2O$ ), la cual separa la borra que se encuentra unida a la semilla.

Para esta etapa se siguió el procedimiento sugerido por Toscano [11], para determinar las cantidades adecuadas de las mezclas de  $H_2SO_4$  y  $H_2O$ . Después de varias determinaciones se procedió a trabajar con una solución de  $H_2SO_4$  al 40%, esto debido a que se obtuvieron los mejores resultados en el proceso de desborre. Para determinar las cantidades de dilución de la concentración se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (1)$$

Donde:

$C_1$ : Solución concentrada

$V_1$ : Volumen concentrado requerido

$C_2$ : Cantidad de concentrado que se necesita diluir

$V_2$ : Volumen de solución deseado

Después de determinar las mezclas, se procedió al desborrado químico.



**Figura 6.** Desborre de semillas de algodón

Posteriormente, se prosiguió a neutralizar las semillas de algodón, utilizando una solución de 6 g de NaOH en 150 ml de agua, debido a que el ácido utilizado puede afectar a la semilla y por consiguiente el aceite extraído de la misma.



**Figura 7.** Neutralización de semilla de algodón

Ya neutralizada, se lavó la semilla para quitar residuos generados del desborre y se dejó secar durante 24 horas.



**Figura 8.** Secado de semilla de algodón

### **3.1.1.3 Prensado mecánico**

Después de tener la semilla sin borra, se procedió a pesar las muestras para la extracción. Se consideraron muestras de 300 g de semilla limpia y neutralizada.

Se pasó a identificar cada una de las muestras, dependiendo del tratamiento a los que serían sometidas. Ya identificadas correctamente las muestras, se procedió a la extracción del aceite.



**Figura 9.** Extracción mecánica de aceite de semilla de algodón



**Figura 10.** Muestra de aceite y torta resultante de la extracción

Después de procesadas todas las muestras, se pesó tanto el aceite como la torta obtenidos de la extracción.

### 3.1.2 Extracción mecánica de aceite de semilla de higuera

#### 3.1.2.1 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos elegido para la extracción de aceite de semilla de higuera fue un diseño factorial. Como se comentaba anteriormente, este diseño permitió evaluar los diversos factores que afectan el rendimiento del aceite.

En la Tabla 6 se muestra el diseño factorial para la extracción, considerando todas las variantes de la prensa mecánica con las que se trabajaron.

**Tabla 6.** Arreglo de factores para el diseño de experimentos

Diseño Factorial				
	T1		T2	
	B1	B2	B1	B2
V1	M1, M2	M3, M4	M5, M6	M7, M8
V2	M9, M10	M11, M12	M13, M14	M15, M16

Donde:

T1: Temperatura 90°C

T2: Temperatura 100°C

B1: Boquilla #6

B2: Boquilla #8

V1: Velocidad 1

V2: Velocidad 2

M: Número de muestra (muestras de 400 g)

Como variable de respuesta tenemos la cantidad de aceite de semilla de higuera obtenido. La significancia fue del 95% ( $\alpha=0.05$ ). El diseño factorial fue de  $2 \times 2 \times 2$  con dos réplicas cada uno de los tratamientos, resultando en un número total de 16 observaciones. La hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ) son las que se muestran a continuación:

$H_0 = \text{Temperatura} = 0$

$H_1 = \text{Temperatura} \neq 0$

$H_0 = \text{Boquilla} = 0$

$H_1 = \text{Boquilla} \neq 0$

$H_0 = \text{Velocidad} = 0$

$H_1 = \text{Velocidad} \neq 0$

En donde, si la condición es igual a cero, significa que ese factor no presenta efecto sobre la variable de respuesta. En caso contrario, significa que si presenta una afectación.

### 3.1.2.2 Preparación de las muestras

Después de elaborar el diseño de experimentos, se procedió primeramente al descascarillado con la finalidad de obtener la semilla.



**Figura 11.** Semilla de higuerilla con cascara

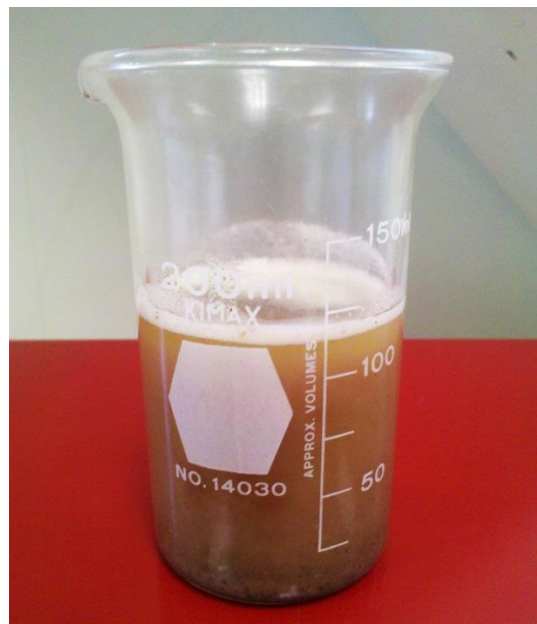
Posteriormente las semillas fueron pesadas e identificadas para obtener las muestras del peso establecido en el diseño de experimentos.

### 3.1.2.3 Prensado mecánico

Teniendo las muestras listas se procedió al prensado mecánico, las cuales se sometieron a los tratamientos previamente diseñados.



**Figura 12.** Extracción mecánica de aceite de higuera



**Figura 13.** Muestra de aceite crudo de higuera

Después de tener todas las muestras de aceite, se pesó el total de las mismas para la interpretación de los resultados.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados del diseño de experimentos de extracción de aceite de algodón

Una vez desarrollado el diseño de experimentos, se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 8.** Resultados de las extracciones de aceite de algodón

Velocidad	Número de Boquilla	Temperatura (°C)	Número de Replica	Aceite (g)	% Aceite de obtenido
V1	B6	T70	1	60.03	20.01%
V1	B6	T70	2	60.53	20.18%
V1	B6	T70	3	64.08	21.36%
V1	B6	T90	1	68.85	22.95%
V1	B6	T90	2	66.37	22.12%
V1	B6	T90	3	68.03	22.68%
V1	B8	T70	1	49.38	16.46%
V1	B8	T70	2	66.51	22.17%
V1	B8	T70	3	53.72	17.91%
V1	B8	T90	1	53.61	17.87%
V1	B8	T90	2	49.04	16.35%
V1	B8	T90	3	55.08	18.36%
V2	B6	T70	1	52.16	17.39%
V2	B6	T70	2	60.84	20.28%
V2	B6	T70	3	58.68	19.56%
V2	B6	T90	1	64.01	21.34%
V2	B6	T90	2	76.33	25.44%
V2	B6	T90	3	58.96	19.65%
V2	B8	T70	1	33.16	11.05%
V2	B8	T70	2	57.93	19.31%
V2	B8	T70	3	59.08	19.69%
V2	B8	T90	1	39.12	13.04%
V2	B8	T90	2	53.92	17.97%
V2	B8	T90	3	44.4	14.80%

#### 4.1.1 Análisis estadístico del diseño de experimentos

Para el análisis de los resultados se utilizó el software Minitab® Versión 15. En la siguiente tabla se presentan los resultados.

- Las condiciones de experimentación que ofrecieron mayor rendimiento fueron las siguientes: velocidad 2, boquilla 6, a 90°C (V2, B6, T90).

#### 4.2 Resultados del diseño de experimentos de extracción de aceite de higuera

Después de la extracción del aceite, se pasó al análisis de los resultados, los cuales se muestran a continuación:

**Tabla 10.** Resultados de las extracciones de aceite de higuera

Velocidad	Número de Boquilla	Temperatura (°C)	Número de Replica	Aceite (g)	% Aceite
V1	B6	T90	1	108,91	36,30%
V1	B6	T90	2	110,19	36,73%
V1	B6	T100	1	106,15	35,38%
V1	B6	T100	2	107,01	35,67%
V1	B8	T90	1	104,76	34,92%
V1	B8	T90	2	104,49	34,83%
V1	B8	T100	1	102,5	34,17%
V1	B8	T100	2	103,69	34,56%
V2	B6	T90	1	110,9	36,97%
V2	B6	T90	2	109,72	36,57%
V2	B6	T100	1	106,43	35,48%
V2	B6	T100	2	105,72	35,24%
V2	B8	T90	1	106,88	35,63%
V2	B8	T90	2	105,38	35,13%
V2	B8	T100	1	103,47	34,49%
V2	B8	T100	2	103,18	34,39%

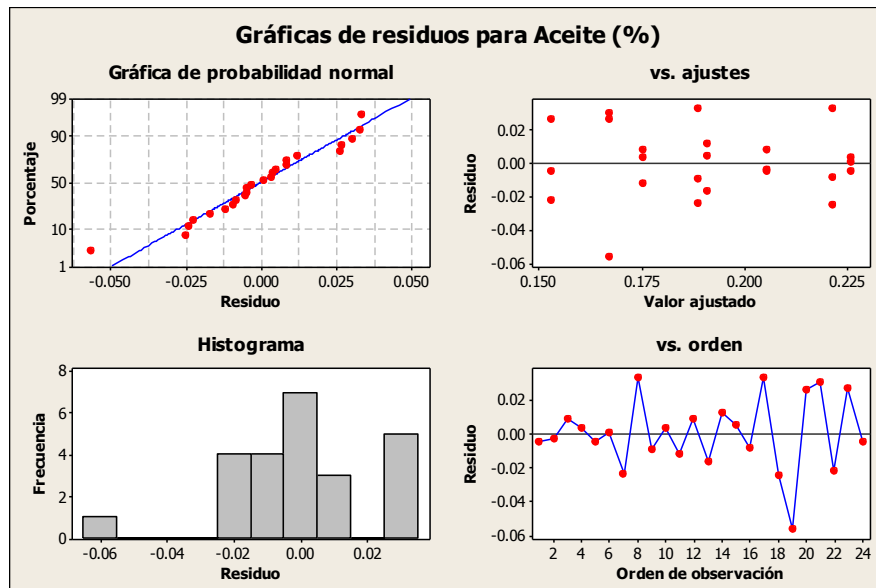
#### 4.2.1 Análisis estadístico del diseño de experimentos

Para el análisis estadístico, se utilizó el software Minitab® Versión 15, por el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 9.** Resultados estadísticos de extracciones

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	Valor P
Velocidad	1	0.0014852	0.0014852	2.29	0.15
Boquilla	1	0.0095893	0.0095893	14.79	0.001
Temperatura	1	0.0002164	0.0002164	0.33	0.571
Velocidad - Boquilla	1	0.0002411	0.0002411	0.37	0.55
Velocidad - Temperatura	1	0.0000308	0.0000308	0.05	0.83
Boquilla - Temperatura	1	0.0023233	0.0023233	3.58	0.077
Velocidad - Boquilla - Temperatura	1	0.000045	0.000045	0.07	0.796
Error	16	0.0103704	0.0006482		
Total	23	0.0243016			

Dichos resultados cumplen con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia, los cuales validan el diseño de experimentos. Esto es, la variable de respuesta se distribuyó de manera normal con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones fueron independientes. Para ello se utilizaron los residuos con el fin de comprobar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen, los residuos se pueden ver como una muestra aleatoria de una distribución normal con media cero y varianza constante, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 12.** Graficas de residuos para la variable de respuesta

En base al diseño de experimentos, se hicieron las siguientes observaciones:

- Se identificó que el tamaño de boquilla, influye directamente en la variable de respuesta. Debido a que el valor de  $p < \alpha$ , la hipótesis alternativa es aceptada.
- Los resultados obtenidos indican que las condiciones donde se obtuvo más rendimiento de aceite de higuera fueron: velocidad 1, boquilla #6 y temperatura de 90°C (V1, B6, T90).
- Se presentó una disminución del rendimiento de aceite de higuera al momento de utilizar la boquilla #8, esto puede deberse a que la presión ejercida disminuyó.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Baja California cuenta con materia prima disponible para el desarrollo de una industria de extracción de aceite de algodón, así como también las condiciones climatológicas para la plantación de higuera en la región. La revalorización y reutilización de estos recursos representa una oportunidad de mercado para impulsar económicamente el desarrollo del campo.

La tecnología empleada para la extracción de aceite es accesible, de fácil aplicación y contribuye a maximizar la cadena de suministro, al obtener, en caso del algodón, un producto de valor agregado, sin descuidar el uso actual de la semilla. En el caso de la higuera, impulsar el uso de energías alternativas y así explotar el potencial de estos recursos.

Las condiciones de operación que propiciaron el mayor rendimiento de extracción de aceite de higuera, utilizando la prensa mecánica, según los resultados estadísticos fueron: velocidad 1, boquilla #6 y temperatura de 90°C (V1, B6, T90). Mientras que para el caso del algodón, las condiciones de mayor rendimiento de extracción mecánica fueron: velocidad 2, boquilla 6, a 90°C (V2, B6, T90).

Los resultados reflejaron que la higuera ofrece un mayor rendimiento que el algodón, por encima del 10%.

### **5.2 Recomendaciones**

- Continuar con la experimentación de la obtención de aceite de semillas oleaginosas, a fin de pulir las condiciones adecuadas para un mayor rendimiento.
- Trabajar con otras semillas oleaginosas dadas en la región, utilizando la maquinaria con la que se cuenta.

- Realizar un análisis de potencial energético y alimenticio, considerando los resultados obtenidos.
- Realizar un análisis económico para la factibilidad de industrias extractoras en la región.
- Seguir con la investigación para evaluar la posible producción de Biodiesel, usando el aceite de higuera obtenido

## REFERENCIAS

## 6. REFERENCIAS

- [1] ChemBioDraw Ultra 13.0
- [2] J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements, G. Knothe, "Biodiesel Analytical Methods", Subcontractor Report August 2002 – January 2004, National Renewable Energy Laboratory.
- [3] J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements, G. Knothe, "Biodiesel Production Technology", Subcontractor Report August 2002 – January 2004, National Renewable Energy Laboratory.
- [4] P. S. Mehta, K. Anand, "Estimation of a lower heating value of vegetable oil and biodiesel fuel", Energy & Fuels, 2009. 23, pp. 3893 – 3898.
- [5] SAGARPA, Monografías de cultivos – Algodón, 2011.
- [6] Financiera Rural, Monografía Semilla de Algodón, 2011.
- [7] National Cottonseed Products Association (NCPA), <http://www.cottonseed.com>
- [8] A. Benavides, P. Benjumea, V. Pashova, "El biodiesel de aceite de higuerilla como combustible alternativo para motores diesel", Dyna, Año 74, No. 153, pp. 141-150, 2007.
- [9] Hemant Y. Shirame, N. L. Panwar, B. R. Bamniya, "Bio Diesel from Castor Oil – A Green Energy Option", Low Carbon Economy, 2011, 2, 1-6.
- [10] Marta Conceicao, Roberlúcia Candeia, Fernando Silva, Aline Bezerra, Valter Fernandes, Antonio Souza, "Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11, 964 – 975.
- [11] Toscano Palomar, Lydia. Instituto Tecnológico de Mexicali. 2012. Comunicación personal

**ANEXOS**



## Propuesta de aprovechamiento de la semilla de algodón en Baja California

<sup>1</sup>Daniela G. L. Montes Núñez, <sup>1</sup>Gisela Montero Alpírez, <sup>1</sup>Marcos A. Coronado Ortega, <sup>1,2</sup>Conrado García González, <sup>1,2</sup>Lydia Toscano Palomar, <sup>1</sup>Héctor Campbell Ramírez, <sup>1</sup>Armando Pérez Sánchez

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California, calle de la Normal S/N, colonia Insurgentes Este, CP 21280, Mexicali, BC, dmontesnunez@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Mexicali. Academia de Química y Bioquímica

### Resumen

En Baja California, el algodón ha desempeñado un papel clave en la agricultura y su producción se concentra totalmente en el Valle de Mexicali. El producto principal del cultivo de algodón es la fibra y tiene como subproducto la semilla de algodón, del cual se derivan otros subproductos tales como el aceite, harinas proteicas y la cascarilla. En 2011, el Valle de Mexicali reportó una superficie cosechada de 32,461 ha de planta de algodón que generaron 143,594 t de algodón y aproximadamente 80,000 t de semilla. Dado que la semilla de algodón post-cosecha, no cuenta con la calidad requerida para ser utilizada como semilla para cultivo, se considera como un residuo, utilizado principalmente, en la alimentación para ganado, desaprovechando una fuente valiosa de aceite vegetal comestible. Es por ello, que en el presente trabajo se hace una propuesta de procesamiento de las semillas de algodón, que consiste en la extracción parcial de aceite vegetal y en la obtención de harina. La extracción parcial permite que la torta resultante cuente con suficiente valor proteico para ser utilizada en la alimentación de ganado. Los resultados indican que es factible extraer 10,100 y 36,600 t de aceite crudo y de harina respectivamente. Tal cantidad de aceite podría satisfacer 1.2 veces la demanda de importación nacional de aceite crudo de algodón y además, aprovechar los subproductos del algodón, maximizando su valor en la cadena de suministro.

**Palabras Clave:** *Aceite de algodón, harina proteica, subproductos.*

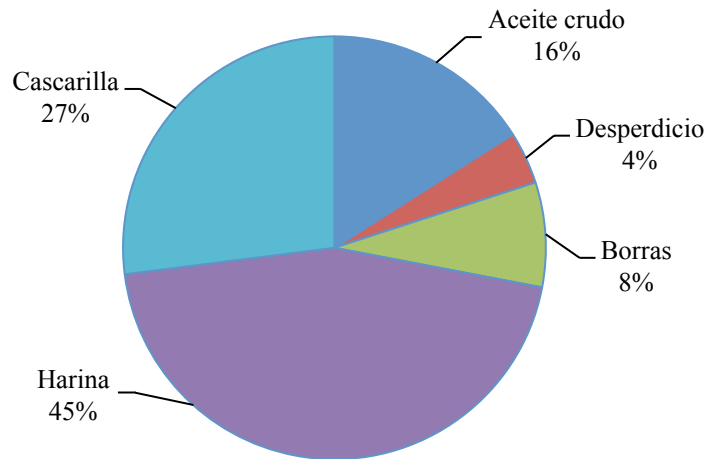
### 1. Introducción

Baja California cuenta con 431,000 ha cultivables, de las cuales el Valle de Mexicali tiene una superficie total de 207,000 ha, donde se practica una agricultura de riego [1]. Entre los principales cultivos que se siembran en el Valle de Mexicali, destaca el algodón, que en 2011 reportó una superficie cosechada de 32,461 ha de planta de algodón [2]. El algodón es una planta de la familia de las malváceas; es la segunda mejor fuente de proteínas después de la soya y el noveno productor de aceite [3]. El producto principal es la fibra y como subproductos la semilla de algodón, de la cual se derivan otros subproductos tales como el aceite, harinas proteicas y cascarilla.

El cultivo de algodón es típico de las zonas cálidas, exigente en agua y su desarrollo comprende de cuatro a cinco meses de temperaturas altas y constantes durante su crecimiento [4]. Una vez que se levanta la cosecha, el algodón es enviado a plantas despepitadoras, donde sufre un proceso de transformación, mediante el cual se obtiene la fibra, semilla y cascarilla [5]. La semilla de algodón es destinada a la industria como insumo oleaginoso, o bien es utilizada directamente por ganaderos en la elaboración de la torta de algodón y en la formulación de alimentos suplementarios para el ganado [4]. Además, como una alternativa a la industria del algodón, se realizan estudios para



aprovechar el aceite de la semilla, residuos de los tallos y capullos como fuente de biocombustibles [6]. En la Figura 1 se observan los productos obtenidos por tonelada de semilla triturada.



**Figura. 1.** Productos de la semilla de algodón [7].

El aceite extraído de la semilla de algodón contiene cantidades significativas de ácidos grasos saturados: ácido linoléico (58%), ácido palmítico (28%), seguido del ácido oleico (13%), ácido esteárico (1%) y pequeñas cantidades de ácido mirístico, araquídico y behénico [8].

La torta que resulta, de la extracción del aceite, se transforma en forraje destinado a la alimentación de ganado [6], la cual contiene aproximadamente 23.1% de proteína digerible [4].



**Figura. 2.** Torta de semilla de Algodón [elaboración propia]

En el Valle de Mexicali, la totalidad de la producción de semilla de algodón se vende a otros estados [5], desaprovechando una fuente valiosa de aceite vegetal que pudiera ser destinado principalmente a la alimentación humana. Es por ello que el objetivo del presente trabajo es hacer una propuesta para su aprovechamiento, que consiste en una extracción parcial de aceite vegetal y en la elaboración de harinas proteicas. Se propone una extracción parcial mediante un prensado



mecánico, debido a que permite una mayor pureza del aceite extraído. Dado que en este proceso el aceite no es extraído completamente de la semilla, permitirá que la torta resultante cuente con suficiente contenido proteico para su utilización en la alimentación del ganado.

## 2. Desarrollo

Los datos, utilizados en este trabajo, referentes a las áreas cultivadas, se consultaron en el sistema de información estadística, disponible en el sitio web de la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS) del estado de Baja California. En los cálculos efectuados para el desarrollo de este trabajo se consideró la cosecha de algodón del Valle de Mexicali del año 2011.

### 2.1 Obtención de aceite y harinas

Existen varios procesos para la obtención de aceite de la semilla de algodón como son: extracción mecánica a alta presión usando una prensa de tornillo, extracción por solventes específicos asociados con el uso de calor y/o agitación y maceración mezclada con agua, alcohol o grasa caliente. Otra alternativa, es la implementación del prensado seguido de la extracción por solventes [9]. En la Figura 3, se muestra el diagrama de procesos desde la cosecha hasta la obtención de los productos y subproductos del algodón.

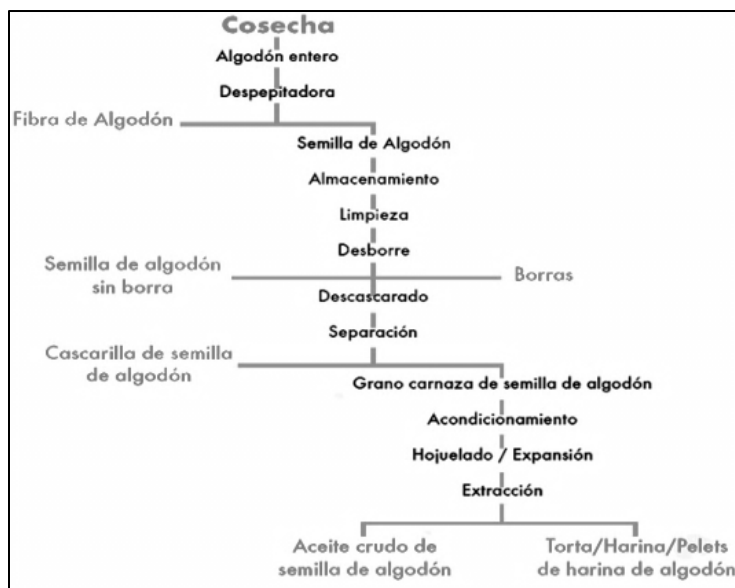
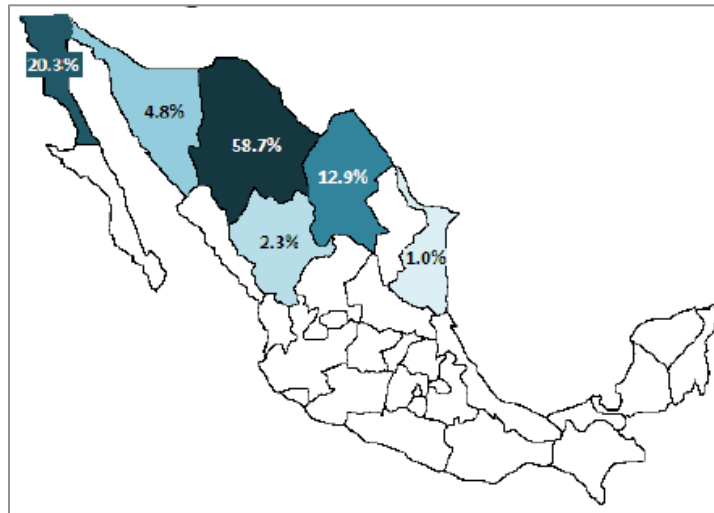


Figura. 3. Proceso de triturado de semilla de algodón [6]

### 2.2. Disponibilidad de algodón en México

En 2010, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), reportó una producción de 440,489 t de algodón a nivel nacional, dando una producción de 242,000 t de semilla de algodón. En la Figura 4 se observan los estados productores de semilla de algodón en México.



*Figura. 4. Principales estados productores de semilla de algodón en México, 2010 [10]*

El estado con mayor producción de semilla de algodón es Chihuahua al concentrar 58.7% de la producción del país. Baja California ocupó el segundo lugar al generar 20.3% del total nacional, Coahuila representó el 12.9%, Sonora 4.8%, Durango 2.3% y el 1% restante lo conformó el estado de Tamaulipas [10].

### **2.3. Disponibilidad de algodón en Baja California**

En 2011, Baja California tuvo una superficie cosechada de 32,461 ha de planta de algodón, concentrado en su totalidad en el Valle de Mexicali, representando un 27% de la producción nacional, las cuales generaron 143,594 t de algodón, con un rendimiento promedio de 4.42 t/ha [2].

### **2.4. Desarrollo experimental**

La extracción parcial del aceite de la semilla de algodón se llevó a cabo mediante la utilización de una prensa tipo tornillo, que se ilustra en la Figura 5, marca Komet modelo CA59G, con capacidad de procesamiento 1.5 kg/h y un rango de temperatura de operación de 25 °C a 140 °C. Además permite la variación de rpm y presión, mediante diversos tamaños de boquillas.



*Figura. 5. Prensa utilizada en la extracción de aceite de semilla de algodón [elaboración propia]*



### 3. Resultados

En la estimación de la cantidad de semilla, se consideró el porcentaje de rendimiento proporcionado por el glosario de términos agrícolas de OEIDRUS, en el cual se indica, que del cien por ciento de producción de algodón, el 55% corresponde a la semilla. Se estima que, por tonelada de semilla de algodón, es posible obtener 45% de harinas [6] y entre 15 y 20% de aceite crudo de semilla de algodón [4]. Por lo tanto, al analizar la información estadística de producción del cultivo de algodón en el Valle de Mexicali, se obtuvieron los siguientes resultados (ver Tabla 1).

*Tabla 1, Resultados obtenidos para el Valle de Mexicali*

Cultivo	Superficie cosechada (ha)	Producción (t)	Semilla (t)	Harinas (t)	Aceite crudo (t)
Algodón Hueso	32,461	143,594	78,977	35,540	10,109

Extracciones preliminares indican que, mediante extracción química con hexano, es posible obtener 24.5% de aceite por kg de semilla procesada, mientras que por prensado mecánico 18.93% de aceite de la semilla cosechada en el Valle de Mexicali (ver Figura 6).



*Figura. 6. Aceite crudo extraído por prensado mecánico [elaboración propia]*

En 2010, el SIAP reportó un total de importaciones, a nivel nacional, de 8,400 t de aceite crudo de semilla de algodón para consumo industrial [11], a partir del potencial estimado para la producción de aceite de algodón, sería factible satisfacer 1.2 veces esta cantidad importada.

En 2011, el precio de la semilla de algodón alcanzó los 160 dólares por tonelada, el aceite 1,196 dólares por tonelada y la harina 273 dólares por tonelada [10], por lo que se puede decir que el aprovechamiento de los productos y subproductos del algodón, pueden llegar a ser económicamente favorable a los agricultores de la región.

### 4. Conclusiones

Baja California cuenta con materia prima disponible para el desarrollo de una industria de extracción de aceite de algodón. Esto representa una oportunidad de mercado para impulsar económicamente el desarrollo del campo y eliminar las importaciones de aceite de algodón. La



tecnología empleada para la extracción parcial de aceite es accesible, de fácil aplicación y contribuye a maximizar la cadena de suministro, al obtener un producto de valor agregado, sin descuidar el uso actual de la semilla.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por la beca otorgada y al Instituto de Ingeniería por las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), "Agricultura de Baja California", 2012 (28 de mayo de 2012), <http://www.cicese.mx/mexico/bc/agricultura.html>
- [2] Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS), consulta de series históricas agrícolas BC, 2012 (30 de mayo de 2012), <http://201.140.167.37/series/>
- [3] Umer R., Farroq A., Gerhard K., "Evaluation of biodiesel obtained from cottonseed oil", Fuel Processing Technology, Vol. 90, 2009, pp 1157.
- [4] Navarro R., Gutiérrez M., Alfonzo N., Piñango L., "Cultivo del algodón en las zonas de vega del río Orinoco y sus afluentes", Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, 2010, Publicaciones Divulgativas.
- [5] SAGARPA-INCA Rural, "Fortalecimiento de la competitividad algodonera del Valle de Mexicali", 2011, pp 23-26.
- [6] SAGARPA-SFA, "Monografía de cultivos: Algodón", 2011, pp. 6.
- [7] Universidad del Estado de Kansas, Estación Experimental Agrícola y Servicio Cooperativo de Extensión, "Composición y Valor Alimenticio de Productos de Semilla de Algodón para Ganado de Carne", 2002, pp 1-3.
- [8] Mehta P., Anand K., "Estimation of a lower heating value of vegetable oil and biodiesel fuel", Energy & Fuels, 23, 2009, pp. 3893-3898.
- [9] Morillo O., Fernández S., Hernández H., Castillo G., Marquina G., "Optimización de los parámetros de extracción de aceite de palma africana utilizando CO<sub>2</sub> supercrítico", Bioagro, Vol. 22 (2), 2010, pp 89-94.
- [10] Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Rectoral, Dirección Ejecutiva de Análisis Sectorial, "Monografía semilla de algodón", 2011.
- [11] SIAP, Balanza Nacional Disponibilidad-Consumo, 2012, (25 de junio de 2012). <http://www.siap.gob.mx/index.php/agricultura/balanza-nacional.html>



## Biomasa residual, opción energética para Baja California

<sup>1</sup>Gisela Montero Alpírez, <sup>1</sup>Margarita Stoytcheva Stilianova, <sup>1</sup>Héctor Campbell Ramírez, <sup>1</sup>Marcos A. Coronado Ortega, <sup>1,2</sup>Conrado García González, <sup>3</sup>Ana M. Vázquez Espinoza, <sup>1</sup>Daniela G. Montes Núñez

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California, Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, CP 21280, Mexicali, BC, México, Tel 52686-5664150, gmontero@uabc.edu.mx

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Mexicali, Academia de Química y Bioquímica

<sup>3</sup>Escuela de Ingeniería y Negocios Guadalupe Victoria, Universidad Autónoma de Baja California

### Resumen

En Baja California, los cultivos de algodón y trigo constituyen parte fundamental de su producción agrícola. Tales cultivos, generan biomasa residual después de cada cosecha, que es casi totalmente, quemada a cielo abierto, con la finalidad de despejar la tierra para el siguiente ciclo. Es así que en el ciclo agrícola 2011, a partir del trigo, se generaron 542,000 t de paja en el Valle de Mexicali. Por su parte, el residuo proveniente del cultivo de algodón, constituido por la vara de algodón, superó las 143,000 t. Además de los residuos agrícolas, un estudio piloto mostró que en el estado se generan aproximadamente 8 millones de litros anuales de aceite vegetal residual, tan solo en el sector restaurantero. Todos estos residuos constituyen una fuente de energía que se desecha anualmente, equivalente a 10.4 PJ. Por ello, además de determinar el potencial biomásico disponible en la entidad a partir de tales residuos, el objetivo de este trabajo es proponer opciones de aprovechamiento de la energía contenida en esta biomasa residual, considerando las características de la materia prima disponible y las tecnologías existentes. Los resultados muestran que existe el potencial para generar energía eléctrica, con un sistema de 105 MW de capacidad instalada, y además obtener anualmente 6.4 millones de litros de biodiesel. La obtención de este biocombustible se efectúa mediante una reacción de transesterificación de los aceites vegetales residuales, considerando una eficiencia promedio de conversión del 80%, basada en resultados experimentales con mezclas obtenidas en Mexicali.

**Palabras Clave:** *Biocombustibles, biodiesel, energía eléctrica, potencial biomásico.*

### 1. Introducción

Acorde con el desarrollo de la humanidad, se ha incrementado la demanda de energía, provocando que el uso de residuos como materia prima para la producción de energía se haya intensificado en el mundo, como alternativa para satisfacer parte de tal demanda. Asimismo, se han desarrollado y adaptado tecnologías basadas en la utilización de biomasa residual, que permiten obtener combustibles líquidos y gaseosos, calor, electricidad [1]. En México, la biomasa contribuye con el 3.8% de la energía primaria, sin embargo, en esta contabilidad solo se considera el bagazo de caña y la leña y no se tienen en cuenta otros recursos biomásicos provenientes de las actividades agrícolas, considerados materiales de desecho [2]. Tal es el caso de los residuos derivados de las cosechas de algodón y de trigo, cultivos que en el Valle de Mexicali constituyen la fuente principal de actividad agrícola y que sustentan la economía regional.

Además de estos residuos derivados de la actividad agrícola, en Baja California, la industria de preparación de alimentos tiene como remanentes los Aceites Vegetales Residuales (AVR), que fueron usados en la cocción de alimentos y que usualmente son enviados al sistema de drenaje



municipal, ocasionando con ello problemas de taponamiento de la red municipal, malos olores y contaminación en general.

De acuerdo con los resultados del proyecto denominado: “Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México”, en la producción de biodiesel a partir de la semilla de colza, soya, jatropha, girasol, y cártamo, así como de sebo animal y AVR, los costos de los insumos representan entre el 59% y 91% de los costos de producción del biodiesel y debido a ello, los AVR constituyen una oportunidad para la producción de biocombustibles [3].

Considerando que tales materiales residuales tienen un alto contenido energético que pueden ser procesados para obtener calor, electricidad o combustibles, en este trabajo se evaluaron las opciones para transformar los residuos agrícolas, constituidos por 543,000 y 143,000 t de paja de trigo y vara de algodón respectivamente, así como los 8 millones de litros de AVR, que anualmente se generan en Baja California, utilizando tecnologías probadas [4].

## 2. Desarrollo

Los residuos agrícolas, considerados en esta evaluación, disponibles en Baja California son la paja de trigo y vara de algodón, los cuales son generados anualmente después de cada cosecha. Además se contabilizaron los AVR generados en los establecimientos de preparación de alimentos.

### 2.1 Tecnologías para la conversión de biomasa celulósica

Las tecnologías existentes para convertir biomasa residual en biocombustibles, energía térmica, electricidad o una combinación de todas éstas, pueden agruparse principalmente en: combustión, gasificación, pirólisis y fermentación, tal como se muestra en la Figura 1 [5].

La combustión es un proceso termoquímico que se efectúa en presencia de oxígeno y tiene como producto principal la obtención de energía térmica, a partir de la transformación de la energía química contenida en el material procesado. Esta energía térmica es a su vez utilizada para generar vapor y electricidad.

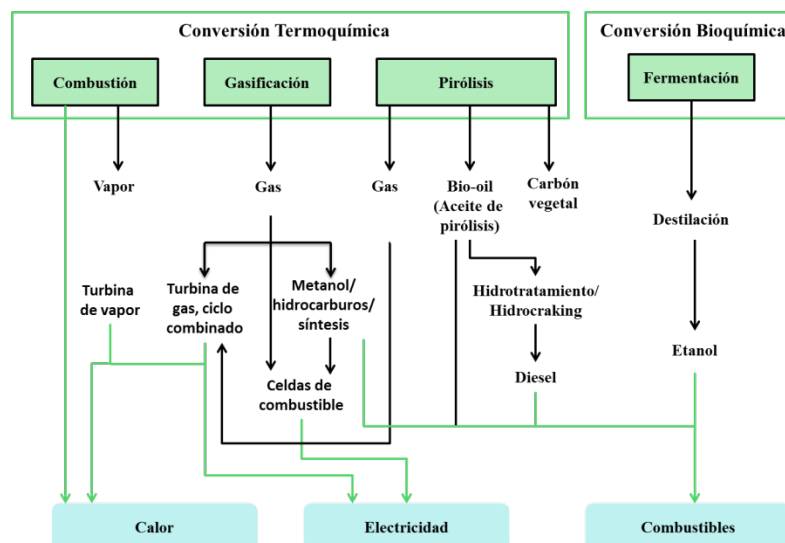


Figura 1. Rutas de conversión de biomasa celulósica agrícola residual.



La gasificación consiste en la conversión de biomasa celulósica en gas de síntesis, el cual puede ser convertido en hidrógeno, metano, mezcla de alcoholes, combustible líquido por medio de la síntesis Fischer-Tropsch, y en otros compuestos químicos [6].

Mediante la pirólisis se efectúa la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. En función de las condiciones de operación, puede obtenerse el denominado bio-oil o aceite de pirólisis, gas de síntesis ( $H_2$  y  $CO$ ), alquitranes y carbón vegetal. El aceite de pirólisis puede ser convertido en diesel mediante procesos de hidrot ratamiento e hidrocrackeo, para modificar sus propiedades de modo tal que sea más adecuado para su uso como combustible líquido.

En la fermentación se efectúan conversiones de tipo bioquímico, es decir intervienen microorganismos, tales como levaduras cuyo objetivo es la conversión de materia orgánica en etanol. Con este proceso se logra la conversión del 50 al 60% de la corriente de alimentación, y el remanente, es un subproducto que puede ser utilizado como composta. En el caso de la celulosa, es necesario efectuar un pretratamiento de hidrólisis para convertirla en azúcares que posteriormente son fermentados.

## 2.2 Tecnologías para la conversión de aceites vegetales en biodiesel

La American Standard for Testing and Materials (ASTM), define al biodiesel como una mezcla de ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos de aceites vegetales o grasas animales, y se utilizan en los motores de ignición-compresión. Los procesos de obtención de tales ésteres difieren, esencialmente, en el tipo de catalizador que utilizan y se denominan: catálisis ácida, catálisis alcalina o una mezcla de ambas y la catálisis enzimática, que se describen enseguida.

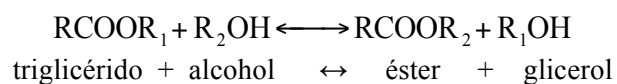
*Catálisis Alcalina.* Se utiliza comúnmente hidróxido de sodio o hidróxido de potasio con un alcohol de cadena corta como el metanol o el etanol, así como con cualquier tipo de aceite. Es recomendable producir el alcóxido para obtener una mejor eficiencia global en la reacción. El proceso con catálisis alcalina se lleva a cabo más rápido que el proceso con catálisis ácida. La temperatura típica a la que se efectúa esta reacción es de  $60\text{ }^\circ\text{C}$  y se completa en aproximadamente 1 hora.

*Catálisis ácida.* En este método se utiliza ácido sulfúrico o sulfónico, el cual cataliza la reacción entre la materia prima, compuesta de ácidos grasos y triglicéridos (aceite o grasa) y el metanol. En ambos tipos de catálisis, un exceso de alcohol mejora el rendimiento de conversión de los triglicéridos, pero la recuperación de glicerol resulta más difícil. La temperatura típica de la reacción es superior a los  $100^\circ\text{C}$  y requiere más de 3 horas para que se complete la conversión.

*Catálisis enzimática.* Se utilizan catalizadores que hacen posible la transesterificación de los triglicéridos, tanto en fase acuosa como en sistemas no acuosos. En esta ruta catalítica, los ácidos grasos libres, presentes en las grasas y AVR, pueden ser convertidos completamente en ésteres alquílicos. Ello representa una ventaja sobre los procedimientos anteriores. Sin embargo, los costos de producción por esta vía, son mayores que los correspondientes a la catálisis alcalina y ácida [7].

*Proceso de transesterificación.* Consiste en reemplazar el glicerol por un alcohol simple, como el metanol o el etanol, de forma que se produzcan ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos.

La reacción de transesterificación puede representarse de la siguiente manera [8]:





donde de manera simplificada: R = cadena de ácidos grasos; R<sub>1</sub> = cadena de triglicérido y R<sub>2</sub> = grupo metilo o etilo

### 2.3 Recursos biomásicos en Baja California

En el ciclo agrícola 2011, el residuo proveniente del cultivo de algodón en el Valle de Mexicali, constituido por la vara de algodón, superó las 143,000 t [9],[10]. Esto fue calculado considerando una superficie sembrada de 32,461 ha, un factor de generación de vara de algodón de 4.42 ton/ha [11] y un poder calorífico igual a 14.79 MJ/kg [12].

El cultivo de trigo en el año 2011, alcanzó las 74260 ha, con un índice de generación de paja de 7.3 t/ha [13]. Se consideró un poder calorífico de 17.5 MJ/kg [14] y que el 85% de la paja generada en cada ciclo agrícola es quemada *in situ* [15].

En relación con los AVR, y como resultado de un proyecto de investigación del Instituto de Ingeniería, en el cual se desarrolló un estudio exploratorio, fue posible efectuar una estimación de los volúmenes de generación de AVR del sector restauranero de Mexicali, que en 2010 sumaron aproximadamente 8 millones de litros anuales [4]. Se efectuaron experimentos utilizando diversas muestras de AVR y en promedio, se obtuvieron 0.8 litros de biodiesel por cada litro de AVR procesado por vía alcalina.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Contenido energético de los materiales residuales

La Figura 2 resume los resultados del contenido energético de la materia residual. De tal modo que los residuos constituidos por la paja de trigo y vara de algodón, arrojan un balance energético de 10,105 TJ. En tanto que de los AVR, es potencialmente recuperable una cantidad anual de 206 TJ.




Materias residuales en BC con alto contenido de energía		
Vara de algodón	Paja de trigo	Aceite vegetal residual
		
143,000 ton	542,000 ton	8,000,000 litros
Disponibilidad anual de materias primas		
4.42 ton/Ha	85%	80%
Recuperación de biomasa agrícola y aceites vegetales		
10 105 TJ Energía equivalente anual liberada por quemas agrícolas		206 TJ Energía equivalente anual
Equivalen a 285 millones de litros de diesel		

Figura 2. Materias primas residuales con potencial energético en Baja California [Elaboración propia].



### 3.2 Opciones de aprovechamiento de la biomasa residual en Baja California

Existen diversas tecnologías disponibles en el mercado para la conversión de biomasa, mediante la combustión directa para generación de energía eléctrica. En la pirólisis y la gasificación a diferencia de la combustión directa, la biomasa es materia prima para producir un combustible de mayor valor (o poder calorífico), el cual puede ser posteriormente utilizado en equipos más especializados y de mayor eficiencia como los denominados CHP (Combustion Heat and Power). Estas tecnologías de conversión de la biomasa en energéticos de mayor valor agregado, implican mayor costo de inversión, operación y mano de obra especializada. Sin embargo, cabe destacar que ambas tecnologías, son capaces de procesar una gran variedad de materiales clasificados como residuos, incluso los denominados peligrosos.

Para la generación de energía eléctrica mediante la combustión de la biomasa, se estima que la mejor opción es distribuirla en módulos pequeños e independientes. Asimismo, es sumamente recomendable que esta planta se construya lo más cercano a la generación de la biomasa para evitar costo de transporte.

La fermentación no se consideró como una opción pertinente para este tipo de materia debido a que los materiales lignocelulósicos, deben ser hidrolizados previamente para convertirlos en azúcares y posteriormente fermentarlos. Sin embargo, tal hidrólisis resulta complicada de llevarla a la práctica debido a manejo de medios ácidos que afectan el rendimiento de las bacterias empleadas en la fermentación.

En relación con los costos de producción, los valores reportados son de 3.8 a 10.2 c/kWh (EU) para un sistema cuya tecnología es la pirólisis que procesa cultivos energéticos; de 7.8 c/kWh (EU) para un gasificador que se alimenta con plantaciones de bajo costo; de 12.7 c/kWh (EU) para generación eléctrica por combustión directa de residuos agrícolas y de 9.3 hasta 12.4 c/kWh (EU) para el caso de generación eléctrica por combustión de paja [16].

## 4. Conclusión

Considerando los residuos generados anualmente, Baja California puede sustituir una fracción importante del consumo de combustibles fósiles, aprovechando la energía contenida en la biomasa residual. Con ello se incrementaría la participación de energías renovables en la matriz energética de México.

La producción de electricidad mediante la biomasa, es una opción competitiva en comparación con la generación eólica proveniente de la planta ubicada en La Rumorosa. Además de los residuos agrícolas considerados en esta evaluación, es recomendable incluir los materiales generados por otros cultivos propios de Baja California. Igualmente, es de suma importancia que además de los residuos oleicos de los restaurantes se contabilicen los AVR generados a nivel domiciliario y que se contemplen alternativas para el procesamiento de residuos como los plásticos, llantas y residuos peligrosos generados en los hospitales, que pueden ser transformados en materiales con gran valor agregado y elevado contenido energético, mediante procesos como la pirólisis y la gasificación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a CONACYT y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto.



### Referencias Bibliográficas

- [1] Demirbas F., Balat M., Balat H. "Biowastes-to-biofuels". *Energy Conversion and Management*. Vol 52 (4). 2011. pp.1815–1828.
- [2] SENER. Secretaría de Energía. "Balance nacional de energía". 2010. pp. 25.
- [3] SENER. Secretaría de Energía. "Potencialidades y viabilidad del uso del bioetanol y biodiesel para el transporte en México". 2006.
- [4] Coronado, M. Estudio de factibilidad de producción de energía a partir de aceite vegetal residual. Caso: Sector restaurantero. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, 2010. México.
- [5] UNEP. *Converting Waste Agricultural Biomass into a Resource. Compendium of Technologies*. 2009. The International Environmental Technology Centre. Osaka/Shiga, Japan. 441.
- [6] Bain R. The Task 33. *Thermal Gasification of Biomass*. International Energy Agency. 2012 (20/02/2012). <http://128.131.132.12>
- [7] Meher, L., Sagar, V., Naik, S. "Technical aspects of biodiesel production by transesterification a review". *Renewable & sustainable energy reviews*. Vol.10(3). (2006). pp.248-268.
- [8] Zhang, Y, Dubé MA, McLean DD, Kates M. "Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment". *Bioresource Technology*. Vol. 89(1). 2003. pp.1-16.
- [9] SFA. Anuario Estadístico de la producción Agrícola para el Estado de Baja California. 2011 (05/08/2008). <http://www.sfa.gob.mx>.
- [10] OEIDRUS. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable. Portal OEIDRUS Baja California. 2012 (07/05/2012). [http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus\\_bca/](http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/).
- [11] Gemtos T., Tsirocoglou T. "Harvesting of cotton residue for energy production". *Biomass and bioenergy*. Vol. 16 (1). 1999. pp. 52.
- [12] Domaiski E., Milne T. Thermodynamic data for biomass conversion and waste incineration. 1986 (05/05/2012). <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/2839.pdf>.
- [13] SFA. Secretaría de Fomento Agropecuario. 2012 (09/05/2011). [http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus\\_bca](http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca).
- [14] McKendry P. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass". *Bioresource Technology* Vol. 83(1). 2002. pp. 37-46.
- [15] Moncada, A., Quintero, M. "Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California". *Región y Sociedad*, Vol XX(43). 2008. pp. 3-24.
- [16] Evans, A., Strezov, V., Evans, T. "Sustainability consideration for electricity generation from biomass". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14(5). 2010. pp. 1419-1427.



## Estimación del potencial energético de la biomasa residual de algodón (*Gossypium Hirsutum*) en Baja California

<sup>1</sup>Marcos A. Coronado Ortega, <sup>1</sup>Gisela Montero Alpírez, <sup>1,2</sup>Conrado García González, <sup>1</sup>Laura Pérez Pelayo, <sup>1</sup>Daniela Montes Núñez, <sup>3</sup>Ana Vázquez Espinoza, <sup>1</sup>Héctor Campbell Ramírez

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California,  
Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, CP 21280, Mexicali, B.C, coronado.marcos@gmail.com

<sup>2</sup> Tecnológico de Mexicali, Academia de Química y Bioquímica.

<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería y Negocios, Guadalupe Victoria. Universidad Autónoma de Baja California.

### Resumen

Baja California en 2011, presentó una superficie cultivada de 225,138 ha. El 14.4% de dicha superficie es utilizada para el cultivo de algodón (*Gossypium Hirsutum*). El residuo principal es la vara de algodón que posee un potencial energético considerable, actualmente desaprovechado, y cuya disposición generalmente es la quema. Esta actividad se lleva a cabo, porque reduce los costos en la preparación de la tierra para el próximo ciclo agrícola y además evita la propagación de plagas y enfermedades en futuros cultivos. La utilización de la biomasa agrícola residual, ha adquirido mayor relevancia internacional como fuente de energía renovable, debido a sus ventajas ambientales, las cuales consisten principalmente en sustituir los combustibles fósiles y contribuir en la mitigación de emisiones contaminantes. Por ello, el objetivo del presente trabajo, es la estimación de la disponibilidad de biomasa residual que se genera del cultivo de algodón y su potencial energético para la generación de calor y energía eléctrica. Asimismo, se lleva a cabo un análisis de los factores que afectarían el desarrollo de una industria de transformación de la biomasa en energía, aplicando la metodología FODA. Los resultados indican que a partir de los residuos de algodón es factible obtener 2.12 PJ, que equivalen a 59,387 m<sup>3</sup> de diesel, y con ello abastecer una planta de potencia con capacidad de 22 MW. Tal magnitud de energía disponible coadyuvaría a la diversificación de la matriz energética de Baja California, que depende del abastecimiento externo de combustibles puesto que no posee recursos petrolíferos propios.

**Palabras Clave:** *bioenergéticos, energía renovable, vara de algodón.*

### 1. Introducción

La biomasa es una fuente de energía renovable cuya utilización se promueve en la actualidad, a nivel internacional. Es definida como la materia orgánica proveniente de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, entre otras [1]. Se estima que para el año 2035 podría contribuir con cerca del 25% de la energía requerida en el mundo, y constituir así uno de los pilares de la transición energética [2]. En México, la producción de energía primaria fue de 9,250.7 PJ en 2010, con una participación de la biomasa del 3.8%, únicamente con leña y bagazo de caña, representando más de la mitad de las fuentes renovables en la matriz energética [3]. Hasta ahora, en México, el aprovechamiento energético de la biomasa, está limitado a procesos de cocción de alimentos en el medio rural y como combustible en los ingenios azucareros [4].

Ante los retos que enfrenta México en cuanto a seguridad energética, disminución de la dependencia hacia los energéticos convencionales, así como la reducción de emisiones de gases contaminantes, es necesario buscar alternativas para diversificar las fuentes de energía. Es por ello que la Secretaría de Energía (SENER), siguiendo las tendencias internacionales que postulan un



cambio en los modelos de producción y uso de la energía, además del compromiso del gobierno mexicano con la sustentabilidad de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo, ha sido facultada para desarrollar la estrategia nacional de la transición energética por razones ambientales, sociales, y económicas. La transición energética implica cambios importantes, que incluyen el impulso de las fuentes de energías renovables (solar, eólica, biomasa, hidráulica) y el uso y aprovechamiento racional de la energía como principales acciones estratégicas. Por lo tanto resulta esencial, evaluar la disponibilidad de dichos recursos y su factibilidad de explotación para la producción de energía.

La obtención y aprovechamiento de la energía de la biomasa, es una oportunidad para propiciar el desarrollo sustentable principalmente en aquellos estados que cuentan con grandes superficies de tierra cultivadas y una dinámica importante en la agricultura. Tal es el caso de Baja California que presentó en 2011 una superficie cultivada de 225,138 ha, con el 14.4% de dicha superficie destinada al cultivo de algodón (*Gossypium Hirsutum*). Como residuo principal se tiene la vara de algodón que posee un potencial energético considerable, actualmente desaprovechado, y cuya disposición generalmente es la quema. Esto se lleva cabo ya que reduce los costos en la preparación de la tierra para el próximo ciclo agrícola y además evita la propagación de plagas y enfermedades en futuros cultivos. Por ello, el objetivo del presente trabajo, es la estimación de la disponibilidad de biomasa residual que se genera del cultivo de algodón y su potencial energético para la generación de calor y energía eléctrica. Asimismo, se lleva a cabo un análisis de los factores que afectarían el desarrollo de una industria de transformación de la biomasa en energía, aplicando la metodología FODA.

### 1.1 Tecnologías de conversión biomasa – energía

El aprovechamiento de la biomasa en la generación de energía eléctrica, tiene su origen en los años 70's, como resultado de la crisis energética global. Hoy en día ante la situación que se presenta, hace necesaria la búsqueda de alternativas al petróleo y sus derivados. Una de ellas, es el uso de la biomasa residual, que cuenta con una gama de opciones probadas para su explotación. Entre las tecnologías mencionadas destacan las siguientes [5]:

- *Pirólisis*. Este proceso se lleva a cabo mediante la descomposición térmica de la biomasa en un ambiente anaerobio, sin la adición de vapor o aire para producir gases y vapores condensables. La combustión de dichos gases ocurre en una turbina de gas, usualmente de ciclo combinado.
- *Gasificación*. La biomasa es parcialmente oxidada controlando el oxígeno a partir de la adición de vapor para producir gases combustibles, que poseen un alto poder calorífico. Los gases son alimentados a una turbina de gas en una planta de potencia ciclo combinado.
- *Combustión directa*. La combustión directa, es la oxidación completa de la biomasa con exceso de aire, para producir dióxido de carbono y agua. Los gases de combustión calientes son utilizados para calentar agua de proceso y obtener vapor, el cual alimentará una turbina, típicamente de acuerdo a un Ciclo Rankine. Esta tecnología es la más antigua y sencilla, pero ineficiente. La gasificación y pirólisis presentan mayores eficiencias, pero requieren significativamente de mayor control de proceso e inversión.

Baja California a pesar de poseer un alto potencial de recursos biomásicos, no cuenta con ningún desarrollo industrial que los utilice para la producción de energía. En la actualidad, las fuentes de energía renovables explotadas para la generación de electricidad son la geotermia, localizada en el Valle de Mexicali, conocida como Cerro Prieto, con una capacidad instalada de 720 MW y el viento en el Parque Eólico ubicado en La Rumorosa, Tecate, con una capacidad de 10 MW. Es de mencionar que el sistema eléctrico de Baja California esta aislado de la red nacional e interconectado al de Estados Unidos de América.



## 2. Desarrollo

### 2.1 Estimación de la biomasa residual y potencial energético

La estimación del potencial energético de las varas de algodón, depende de la superficie cultivada de algodón, índice de generación de residuo y el poder calorífico inferior (PCI). Por ello, se consultó y analizó la información de la bases de datos de la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS), en donde destacó una superficie cultivada de algodón para el 2011, de 32,461 ha [6], en el Valle de Mexicali, región que cuenta con toda la producción del estado de Baja California.

El PCI para las varas de algodón considerado fue de 14.79 MJ/kg [7]. En cuanto al índice de generación de residuo, se utilizó 4.42 t/ha de algodón cultivado [8].

De acuerdo a la ecuación 1, se realizó la estimación de la cantidad generada de vara de algodón:

$$C_{va} = S_a \times I_r \quad (1)$$

donde  $C_{va}$  = Cantidad de vara de algodón generada (t),  $S_a$  = Superficie de algodón cosechada (ha),  $I_r$  = Índice de residuo (t/ha).

En la determinación del potencial energético de las varas de algodón, se utilizó la ecuación 2:

$$P_e = (C_{va} \times 1000) \times PCI \quad (2)$$

donde  $P_e$  = Potencial energético (MJ) y  $PCI$  = Poder calorífico inferior (MJ/kg).

Una vez obtenido el potencial energético, se estimó la capacidad de generación eléctrica a partir de la biomasa residual. Para ello, se consideró una planta de potencia que podría operar bajo un Ciclo Rankine, con una eficiencia de conversión del 30% [9] y tiempo de operación de 11 meses. Esta planta utilizaría la combustión directa de la biomasa, por ser la tecnología que requiere de menor inversión en equipos de tratamiento físico y termoquímico de la materia a procesar en comparación con la pirólisis y gasificación. El cálculo de la capacidad de generación eléctrica se hizo en base a la ecuación 3:

$$C_{ge} = (P_e / T_{op}) \times E_c \quad (3)$$

donde  $C_{ge}$  = Capacidad de generación eléctrica (MW),  $T_{op}$  = Tiempo de operación (s), y  $E_c$  = Eficiencia de conversión.

Posteriormente se efectuó un comparativo entre las fuentes de producción de electricidad existentes en Baja California y lo que representaría la inclusión de una planta de potencia que opera con biomasa residual estimada.

### 2.2 Análisis FODA

Se aplicó la metodología FODA para evaluar los factores externos e internos que afectan el desarrollo de una industria para la obtención y aprovechamiento de la energía a partir de biomasa residual, como es el caso de los residuos del algodón. Las fortalezas y debilidades de una industria son características internas y son controlables, mientras que las oportunidades y amenazas son factores externos en los que la industria no tiene control directo, pero pueden reaccionar en determinando momento a su favor. La implementación del análisis FODA, permite a una industria entender sus fortalezas y explotar sus oportunidades y planificar en base a ellas, así como reconocer, atender o evitar sus debilidades y defenderse de cualquier amenaza conocida. Estos factores fueron analizados cualitativamente [10].



### 3. Resultados

#### 3.1 Estimación de la biomasa residual y potencial energético

Los resultados indicaron una generación de varas de algodón de 143,478 t, con un potencial energético de 2.12 PJ, que equivalen a 59,387 m<sup>3</sup> de diesel. A partir de este recurso biomásico, sería factible abastecer una planta de potencia con capacidad de 22 MW (2.2 veces la capacidad instalada del Parque Eólico La Rumorosa) y cubrir la demanda de electricidad de 50,684 usuarios del sector residencial de Baja California, que presenta un consumo eléctrico promedio anual de 3,489 kWh por vivienda [11]. La generación eléctrica bruta anual de la planta se calculó en 176,836.167 MWh. La Tabla 1 muestra el consumo de energéticos estimado para diferentes tipos de centrales eléctricas existentes en la región, además de la planta que operaría con biomasa, considerando como base la generación bruta previamente mencionada.

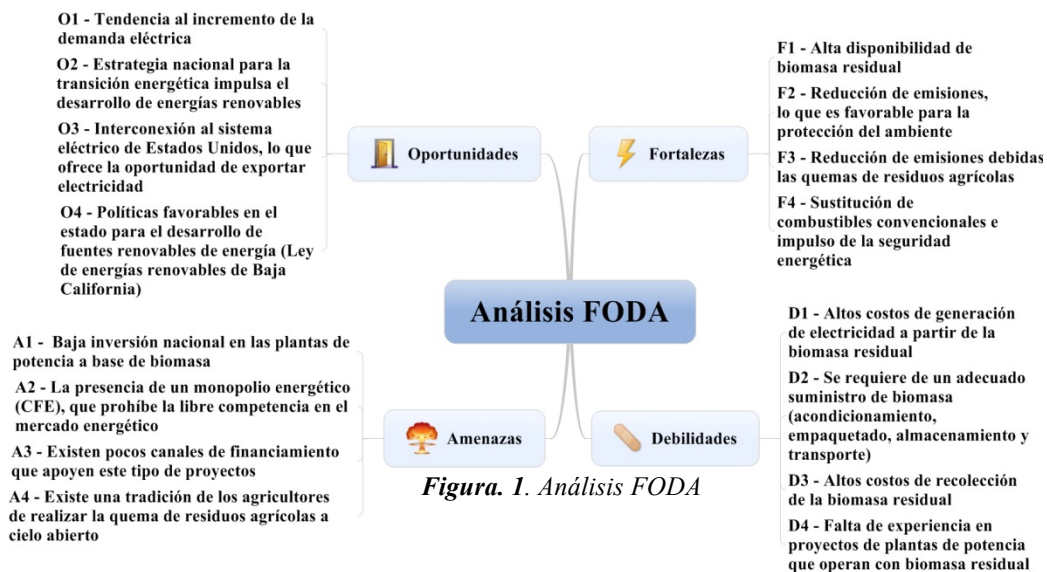
*Tabla 1, Definición de las variables para el modelo*

Central eléctrica	Energético	Consumo	Unidades
Geotérmica	Vapor geotérmico	1,419,734	t
Ciclo combinado	Gas natural	35,952,507	m <sup>3</sup>
Ciclo simple	Gas natural	43,005,391	m <sup>3</sup>
Turbogás	Diesel	99,329	m <sup>3</sup>
Biomasa	Vara de algodón	143,478	t

Como se puede observar, la utilización de la biomasa residual en la producción de energía eléctrica, implicaría el beneficio de sustituir significativamente los combustibles convencionales.

#### 3.2 FODA

En la Figura 1, se ilustra el análisis FODA, donde se identifican cada uno de los factores internos y externos implicados en el desarrollo de una industria de transformación de la biomasa residual en energía.



*Figura. 1. Análisis FODA*



En la Figura 2, se muestra una matriz donde se relacionan los factores externos e internos, y las estrategias aplicadas para explotar las fortalezas y oportunidades, asimismo atacar las debilidades y amenazas.

		Debilidades				Fortalezas			
		D1	D2	D3	D4	F1	F2	F3	F4
Amenazas	A1				E1				
	A2	E6		E6	E5				E2
	A3	E2							
	A4		E4	E4			E3	E4	E1
Oportunidades	O1					E1			
	O2				E1				E3
	O3	E2				E2			
	O4		E4					E4	

**Estrategias**

- E1: Capacitación e incremento de la investigación y desarrollo en tecnologías para la utilización y conversión de la biomasa residual en energía
- E2: Exportar electricidad generada a partir de la biomasa aprovechando el incremento de la demanda de energía eléctrica de California
- E3: Impulsar la revalorización, utilización y aprovechamiento energético de la biomasa residual
- E4: Buscar apoyo por parte del gobierno que fomente a los productores la recolección y acondicionamiento de los residuos agrícolas
- E5: Proponer y fomentar políticas que impulsen una plataforma de libre competencia en el mercado energético
- E6: Proponer incentivos y subsidios a la generación de electricidad a partir de fuentes renovables para amortiguar costos

*Figura. 2. Matriz relacional-FODA*

Las principales fortalezas identificadas para el uso de la biomasa residual como energético son su alta disponibilidad, el favorecimiento a la protección del ambiente como la reducción de emisiones y desarrollo sustentable, al evitar las quemas agrícolas a cielo abierto y sustituir una fracción importante de los combustibles convencionales.

En lo que corresponde a las debilidades se mencionan altos costos de generación de energía a partir de la biomasa [5], ya que esta última, tiene que ser recolectada en los campos agrícolas lo cual implican, costos de maquinaria, mano de obra, combustibles, entre otros, y además requiere de un acondicionamiento adecuado de la biomasa como la formación de briquetas o pellets, por su baja densidad para facilitar su transportación y procesamiento. Aunado a lo anterior, se deben considerar grandes espacios para su almacenamiento, asegurando las condiciones óptimas de seguridad.

Con el fin de amortiguar los costos e impulsar la generación de electricidad a partir de la biomasa residual, es esencial la participación del gobierno mediante la aplicación de incentivos y subsidios tanto a los productores como a los agricultores (proveedores de la biomasa residual) para que en lugar de que dispongan de los residuos agrícolas mediante la quema, los preparen para su reutilización en la producción de energía.

La falta de experiencia en proyectos de esta naturaleza, puede ocasionar que los costos proyectados de inversión sean más propensos a ser rebasados, por lo que es necesaria la capacitación e incremento de investigación y desarrollo en tecnologías para la utilización de la biomasa en la producción de energía. Dentro de las amenazas principales para el desarrollo de esta industria, es la presencia de un monopolio que inhibe la libre competencia en el mercado energético. Es por ello que estratégicamente se tienen que proponer políticas que impulsen la posibilidad de comercializar y distribuir energía al sector público o privado en un ambiente competitivo. En caso de no ser posible al corto plazo, es posible aprovechar la interconexión eléctrica entre Baja California y California, con la posibilidad de exportar energía hacia dicho estado, ya que su objetivo para el año 2020 es suministrar el 33% de su electricidad a partir de fuentes renovables, aun cuando esta sea importada. La situación coyuntural actual en materia energética, ambiental, social y económica está dando lugar a una serie de oportunidades para que las energías renovables incrementen su



participación en la matriz energética, a través de proveer un marco regulatorio que lo fomente, como son las leyes de: aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética, promoción y desarrollo de bioenergéticos y energías renovables de Baja California. Esto resulta benéfico para una región como Baja California, que depende del abastecimiento externo de combustibles puesto que no posee recursos petrolíferos propios.

#### 4. Conclusiones

La biomasa residual, en este caso, las varas de algodón representan un potencial energético importante, que en la actualidad no es aprovechado en Baja California. La revalorización y reutilización de estos recursos en la producción de energía, implica ventajas importantes para sustituir a los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases contaminantes. Para romper el status quo en cuanto a la obtención y el aprovechamiento energético de la biomasa en la generación de calor y/o electricidad, es necesaria una plataforma ideal para la promoción de proyectos de esta naturaleza, que incluya un marco regulatorio que permita la libre competencia en el mercado energético eliminando las barreras existentes en cuanto a comercialización y distribución. Por lo que es necesario que el sector gubernamental, productivo y educativo formen una sinergia para promover e impulsar la participación de las energías renovables encaminados hacia una transición energética basada en la sustentabilidad.

Se recomienda realizar evaluaciones técnico-económicas, con el objetivo de determinar la factibilidad del aprovechamiento energético de la biomasa residual del cultivo de algodón.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a CONACYT y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por su apoyo en la realización de este trabajo.

#### Referencias Bibliográficas

- [1] SENER. Secretaría de Energía. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. 2008 (02 de mayo de 2012). <http://www.sener.gob.mx>.
- [2] REMBIO. Red Mexicana de Bioenergía. “La bioenergía en México: situación actual y perspectivas. 2011. pp. 11.
- [3] SENER. Secretaría de Energía. “Balance nacional de energía”.2010. pp. 25.
- [4] Enríquez Poy, M. “Prospectiva de la cogeneración de la agroindustria de la caña de azúcar en México”. 2009. Presentación en: VI Reunión Nacional Red Mexicana de Bioenergía y Simposio Internacional de Proyectos Bioenergéticos, México.
- [5] Evans A., Strezov V., Evan T. “Sustainability considerations for electricity generation from biomass”. *Renewable and sustainable energy reviews*. Vol.14 (5). 2010. pp. 1420.
- [6] OEIDRUS. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable. Portal OEIDRUS Baja California. 2012 (07 de mayo de 2012). [http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus\\_bca/](http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/).
- [7] Domaiski E., Milne T. Thermodynamic data for biomass conversion and waste incineration.1986 (05 de mayo de 2012). <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/2839.pdf>.
- [8] Gemtos T., Tsrircoglou T. “Harvesting of cotton residue for energy production”. *Biomass and bioenergy*. Vol. 16 (1). 1999. pp. 52.
- [9] IEA. International Energy Agency. Biomass for Power Generation and CHP, 2007 (03 de mayo de 2012). <http://www.iea.org/techno/essentials.htm>
- [10] Zhao Z., Yan H. “Assessment of the biomass power generation industry in China”. *Renewable energy*. Vol. 37 (1). 2012. pp. 54.



[11] INEGI. “Anuario estadístico de Baja California”. 2011 (31 de mayo de 2012).  
<http://www.inegi.org.mx/sistemas/productos>.



## Impacto en consumo y propuesta de tratamiento del agua en el proceso de purificación del biodiesel en Baja California, México

<sup>1,2</sup>Conrado García González, <sup>1</sup>Gisela Montero Alpírez, <sup>1</sup>Marcos A. Coronado Ortega, <sup>1</sup>Daniela Montes Núñez, <sup>3</sup>Ana M. Vázquez Espinoza

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California,  
Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, CP 21280, Mexicali, BC. cnrdgarcia@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Mexicali, Academia de Química y Bioquímica

<sup>3</sup>Escuela de Ingeniería y Negocios Guadalupe Victoria, Universidad Autónoma de Baja California

### Resumen

El biodiesel es una fuente de energía renovable, pero no necesariamente se considera sustentable, ya que depende del óptimo manejo de los insumos y el tratamiento de los desechos generados. Por otra parte, la producción y consumo del biodiesel contribuyen en la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, y SO<sub>x</sub>, sin embargo, como toda actividad antropogénica tiene un impacto al ambiente, como son el consumo de agua y generación de aguas de desecho. En el estado de Baja California, existe un potencial de producción de biodiesel a partir de recursos, tales como grasas amarillas y aceites vegetales residuales, estimado en 1,300 y 6,400 m<sup>3</sup> respectivamente. Una vez que se lleva a cabo la reacción de transesterificación, por el método alcalino, el siguiente paso es la separación del biodiesel y la glicerina por diferencia de densidades. Posteriormente se purifica el biodiesel, para ello existen diversas técnicas que emplean por lo menos el triple de volumen de agua por volumen de biodiesel a procesar. Al finalizar el proceso de purificación, el agua residual contiene diversos contaminantes, entre los cuales destacan grasas, aceites, glicerina, metanol y catalizador residual, en cantidades que exceden los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), por lo que deben ser removidos antes de descargarlos. El tratamiento del agua residual es determinado de acuerdo a su disposición final. Se presenta aquí una evaluación del consumo de agua de acuerdo con las tecnologías utilizadas para lavar el biodiesel, así como de las propuestas de tratamiento del agua residual.

**Palabras Clave:** *Biomasa, bioenergéticos, energía renovable, tratamiento de aguas.*

### 1. Introducción

El consumo de diesel en Baja California, durante el período 2000-2010, fue en promedio de 717,211 m<sup>3</sup>, volumen considerable, que se propone sustituirlo en forma gradual con biodiesel, obtenido a partir de diferentes materias primas disponibles en el estado, aunque su producción en la actualidad es inexistente a escala comercial [1].

Las materias primas utilizadas para la producción de biodiesel, pueden ser Aceites Vegetales Residuales (AVR) y Grasas Amarillas (GA) generados por la preparación de alimentos y procesos de sacrificio respectivamente. Existen diversas técnicas empleadas para la transformación de los AVR y GA en biodiesel, la más empleada, es la vía alcalina, para ello se utiliza como catalizador hidróxido de sodio o potasio, entre 0.7 a 1.0% en peso y una relación molar de metanol de 6:1 y en ocasiones de 9:1 como exceso, para asegurar una alta eficiencia.

Las condiciones de reacción son 60°C por una hora y agitación intensa [2]; debido a esta última, la glicerina obtenida se dispersa en el medio en formas de partículas pequeñas, provocando que se requiera mayor tiempo para decantarla [3].

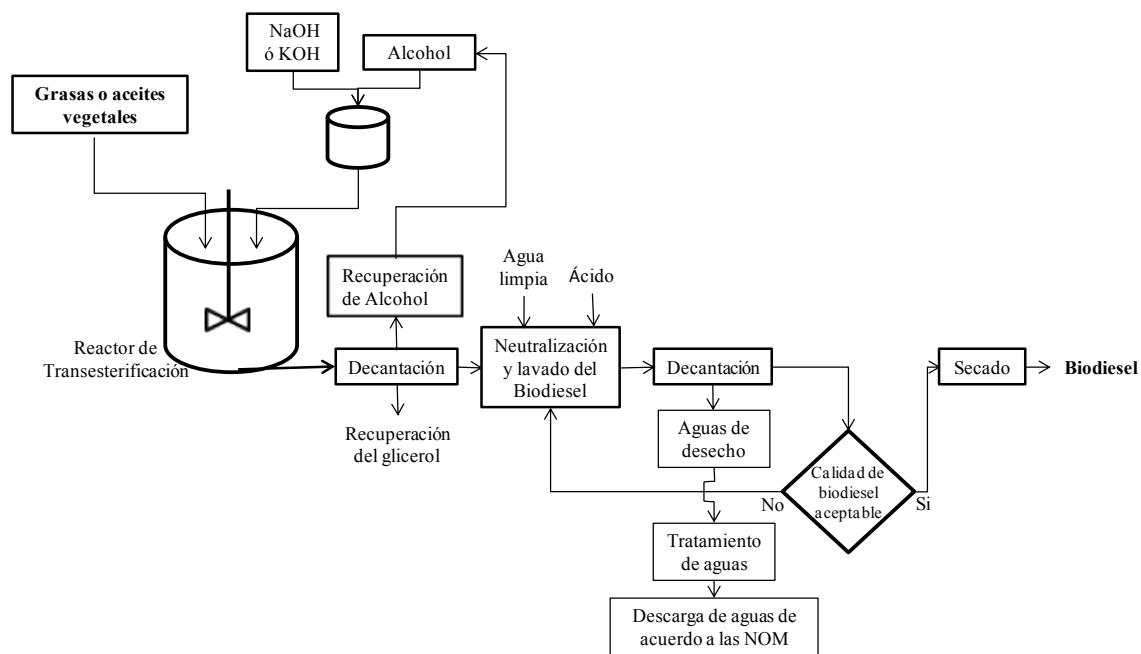


La reacción de transesterificación en los mejores casos tiene una eficiencia entre el 95 al 98%, por lo que parte de la materia prima que no reaccionó se encuentra presente en los productos obtenidos, y estos residuos son considerados contaminantes que deben ser removidos [4].

Para asegurarse que el biodiesel contribuya a resolver la problemática energética, es necesario hacer un análisis integral de ciclo de vida, que cuantifique todas las emisiones asociadas al uso de estos productos, muy en especial lo relacionado con la descarga de aguas residuales [5]. Por lo que el objetivo del presente trabajo, es evaluar el consumo de agua relacionada con las diferentes tecnologías para el lavado del biodiesel que potencialmente pudiera producirse en Baja California, a partir de fuentes consideradas como residuos, tales como GA y AVR, con la posibilidad de producir 1,300 y 6,400 m<sup>3</sup> respectivamente [1], y las propuestas de tratamiento según la disposición del recurso hídrico, en concordancia con las normas ambientales aplicables.

## 2. Desarrollo

El proceso de purificación de biodiesel comienza con la separación, utilizando para ello un equipo decantador, en el cual, se aprovechan la diferencia de densidades y el efecto de la gravedad, para separar los ésteres y la glicerina; donde la segunda arrastra consigo la mayor parte de jabón, catalizador y alcohol [6]. Al mismo tiempo que se realiza la decantación, se efectúa la recuperación del metanol remanente, para utilizarse en el siguiente lote de producción de biodiesel (ver Figura 1). Finalizada la decantación, y debido a la presencia de catalizador residual en el biodiesel, se neutraliza con ácido fosfórico o acético. Enseguida se procede al lavado del biodiesel utilizando agua.



**Figura. 1.** Proceso de producción y purificación de biodiesel [elaboración propia]

Para que el biodiesel se considere aceptable, debe cumplir con los parámetros definidos en la norma ASTM D6751-08a. En la Tabla 1, se muestran los parámetros de calidad del biodiesel relativos al lavado.



**Tabla 1, Especificaciones de calidad del biodiesel (B100) de acuerdo a la norma ASTM D6751-08a relativas al proceso de purificación [ 7]**

Propiedad	Límite	Unidad
Calcio y magnesio combinado	5 max.	ppm
Alcohol: 1.- Contenido de metanol o 2.- Punto de ignición	0.20 max. 130 min.	% vol °C
Agua y sedimentos	0.05 max.	% vol
Glicerina libre	0.020 max.	% masa
Glicerina total	0.240 max.	% masa
Sodio y potasio combinado	5 max.	ppm

## 2.1 Lavado del biodiesel utilizando agua

El proceso de purificación de biodiesel, no se encuentra regulado bajo ninguna norma, por lo que cada productor implementa la técnica que mejor se ajuste a sus necesidades, con el fin de alcanzar la calidad aceptable del biodiesel, definido en la norma ASTM. Es necesario que el agua empleada en el lavado del biodiesel cuente con la menor cantidad de iones disueltos e impurezas, de lo contrario, estos serán transferidos al biodiesel. A continuación se presentan las principales técnicas utilizadas para la purificación del biodiesel con agua como medio de arrastre [8].

1. *Lavado con niebla.* Consiste en rociar una nube de pequeñas gotas de agua, sobre la superficie del biodiesel, de igual volumen que el combustible a procesar, sin generar turbulencia. El agua arrastra hasta el fondo del contenedor las impurezas. Este procedimiento se repite 3 veces. Algunas de sus desventajas, radican en que es un proceso lento y requiere mucha agua.
2. *Lavado por burbujas de aire.* Esta técnica requiere de la adición de aire por la parte inferior del recipiente, que contiene 1.5 veces más de agua que de biodiesel. Las burbujas de aire suben atravesando primero el agua y luego el biodiesel. Cada burbuja de aire queda cubierta por una fina película de agua que interactúa con el combustible y cuando la burbuja llega a la superficie, se rompe provocando la formación de pequeñas gotas de agua, que vuelven al fondo, arrastrando las impurezas. Se sugieren cuatro lavadas consecutivas. Algunas de las desventajas de este proceso es que requiere de bastante tiempo y debido a la integración de aire, produce oxidación del biodiesel.
3. *Lavado por agitación.* Esta forma de lavado, requiere de un contenedor con un dispositivo tal que, aporte la energía para agitar la mezcla biodiesel-agua, en cantidades iguales hasta que tenga un aspecto lechoso homogéneo, se deja reposar y, si no emulsiona se continúa con la decantación del agua. Este procedimiento se realiza 3 veces. Como ventajas se tiene que es rápido y efectivo, no oxida el combustible. Por otra parte es riesgoso, debido a que evidencia un biodiesel de mala calidad, al formar una emulsión biodiesel-agua.



4. *Lavado por chorro de agua.* Este método es sugerido cuando el biodiesel no es de buena calidad; consiste en suministrar agua en flujo constante de tal forma que perturbe al biodiesel lo menos posible, en cantidad 5 veces la cantidad del biodiesel. Las ventajas son que evita la emulsificación y es rápido; en contraparte consume grandes cantidades de agua.

## 2.2 Principales contaminantes en el agua residual del lavado del biodiesel

Una vez purificado el biodiesel, el agua residual empleada para el lavado se somete a tratamiento para poder disponerlo de acuerdo a la normatividad. Es impreciso mencionar cuáles son los contaminantes que se encuentran presentes en el agua residual, ya que estos dependen de la materia prima utilizada, catalizadores y eficiencia de proceso; por lo general se puede mencionar entre los principales contaminantes al jabón, glicerina, grasas, aceites y metanol.

## 3. Resultados

La cuantificación del agua para el lavado de biodiesel esta en función de la técnica seleccionada. Ésta última, se elige dependiendo de su capacidad para la remoción de contaminantes del biodiesel, y no en función del consumo de agua. La estimación de la cantidad de agua para lavado, se lleva a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$C_{\text{agua}} = P_{\text{biodiesel}} \times R_{\text{lavado}} \times R \quad (1)$$

donde:  $C_{\text{agua}}$  = cantidad de agua requerida para el lavado del biodiesel ( $\text{m}^3$ ),  $P_{\text{biodiesel}}$  = producción de biodiesel ( $\text{m}^3$ ),  $R_{\text{lavado}}$  = relación de agua de lavado-biodiesel, y  $R$  = la cantidad de repeticiones del lavado del biodiesel.

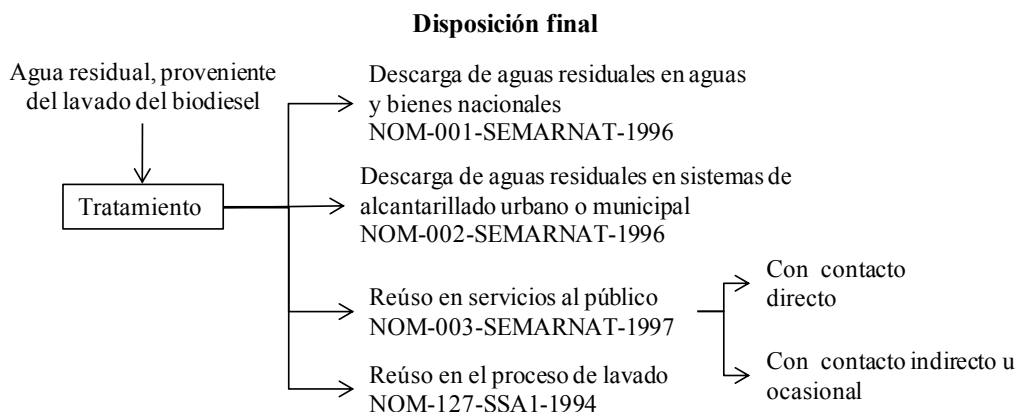
En la Tabla 2, se muestra un estimado de consumo de agua anual para cada una de las técnicas de lavado descritas anteriormente, considerando un potencial de producción de biodiesel en Baja California de  $7,700 \text{ m}^3$  [1].

**Tabla 2.** Consumo de agua para lavado del biodiesel, en Baja California

Técnica de purificación de biodiesel con agua	Relación cantidad de biodiesel-agua	Número de lavados	Cantidad de agua ( $\text{m}^3$ )
Lavado con niebla	1-1	3	23,100
Lavado por burbuja de aire	1-1.5	4	46,200
Lavado por agitación	1-1	3	23,100
Lavado por chorro de agua	1-5	1	38,500

### 3.1. Normatividad aplicable a la descarga de aguas de desecho

Existen diversas opciones para la descarga del agua residual que deben cumplir con las disposiciones normativas en materia de descarga de aguas y aguas residuales. Se presentan cuatro alternativas acordes a la normatividad aplicable (ver Figura 2). La decisión de descarga le corresponde al productor, y ésta sirve de apoyo para definir el procedimiento del tratamiento de las aguas residuales.



*Figura. 2. NOM aplicable según destino de la descarga del agua residual de lavado [9]-[12]*

### 3.2 Sugerencia de tratamiento del agua residual, del proceso del lavado del biodiesel

Debido a la gran cantidad de contaminantes presentes en el agua residual procedente del lavado de biodiesel, no es posible descargarla directamente del contenedor donde se desarrolló esta operación. Por ello, es obligatorio realizar un tratamiento a estas aguas, y se sugiere sea en el orden que se presenta a continuación.

1. Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos sólidos fácilmente separables, a través de cribas.
2. Tratamiento primario, que comprende del retiro de materia flotante y de sólidos suspendidos, empleando para ello tanque de sedimentación.
3. Tratamiento secundario, que consiste en un proceso anaerobio, para reducir la mayor parte de la materia orgánica presente, y está constituido de una serie de procesos microbiológicos, en ausencia de oxígeno. Este proceso se lleva a cabo por bacterias. Una de las ventajas frente a la digestión aerobia, es que requiere de instalaciones menos costosas, no hay necesidad de suministrar oxígeno, por lo que el proceso es más barato y el requerimiento energético es menor. Otra ventaja es que produce una menor cantidad de lodos biológicos.
4. Los lodos generados en el proceso anterior, podrían tentativamente disponerse como abono y mejorador de suelos; todo depende de si cumple con las características previstas en la NOM-004-ECOL-2002 [13].

Esta serie de tratamientos de aguas de lavado del biodiesel, son suficientes para las descargas mencionadas en la Figura 2, excepto para su uso como agua potable, ya que requiere de más etapas de tratamiento, como por ejemplo, digestión aerobia, reducción de sólidos y desinfección.

## 4. Conclusiones

La industrialización del biodiesel, demanda un requerimiento de agua importante para el proceso de lavado del biocombustible. La cantidad de agua necesaria para la purificación de 7,700 m<sup>3</sup> de biodiesel, es por lo menos de 23,100 hasta 46,200 m<sup>3</sup>. Hay que destacar que la calidad de agua para el lavado, debe ser de calidad superior a la potable, por lo que se debe contemplar una planta purificadora para este fin. El agua residual contiene contaminantes inherentes al proceso de producción de biodiesel, por lo que debe recibir un tratamiento tal, que los reduzca y cumpla con



los límites máximos permisibles previo a su descarga, establecido en la normatividad oficial vigente.

### Agradecimientos

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

### Referencias Bibliográficas

- [1] Montero Alpírez G, Stoytcheva M. *Biodiesel – Quality, Emissions and By-Products*. 1<sup>ra</sup> Edición. 2011. Editorial InTech. Croacia. pp 140-141.
- [2] Benjumea, P. N., J.R. Agudelo y L.A. Ríos. *Biodiesel: Producción, calidad y caracterización*. 1<sup>ra</sup> edición, p 152. 2009. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- [3] Van Gerpen, J. “*Biodiesel Production Technology*”. Subcontractor Report National Renewable Energy Laboratory. 2004. 110 p.
- [4] Gerreiro P. 2003. (23/mayo/2012). [http://residuos.quercus.pt/xFiles/scContentDeployer\\_pt/docs/DocSite1850.pdf](http://residuos.quercus.pt/xFiles/scContentDeployer_pt/docs/DocSite1850.pdf)
- [5] Molina, M. 2012 (14/mayo/2012). <http://centromariomolina.org/aumento-de-temperaturas-en-el-norte-de-mexico/>
- [6] Lizana D. 2008 (23/mayo/2012). [http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes\\_Biodiesel\\_D.pdf](http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes_Biodiesel_D.pdf)
- [7] National Renewable Energy Laboratory. *Biodiesel Handling and Use Guide*. Cuarta edición. 2008. US Department of Energy. Oak Ridge. p. 13.
- [8] Addison K., 2012 (12-03-2012). [www.journeytoforever.org/biodiesel\\_vehicle.html#washtst](http://www.journeytoforever.org/biodiesel_vehicle.html#washtst)
- [9] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. (11/junio/2012). <http://www.semarnat.gob.mx/servicios/antiores/otroleyes/normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-001-ECOL.pdf>
- [10] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. (11/junio/2012). <http://www.semarnat.gob.mx/servicios/antiores/otroleyes/normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-ECOL-002.pdf>
- [11] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. (11/junio/2012). <http://www.semarnat.gob.mx/servicios/antiores/otroleyes/normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-ECOL-003.pdf>
- [12] Secretaría de Salud. 2000. (11/junio/2012). <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>
- [13] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. (11/junio/2012). *NOM-004-ECOL-2002*. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/200610lodos.pdf>