

**INFORME SEMESTRAL DE AVANCE ACADÉMICO**  
**PROGRAMA PARA EL DESARROLLO PROFESIONAL DOCENTE,**  
**PARA EL TIPO SUPERIOR (PRODEP)**  
**PROYECTO “*TECNOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA***  
***SOLUCIONAR PROBLEMAS ACTUALES EN EL ÁMBITO ENERGÉTICO***  
***EN LA REGIÓN DE LA CIÉNEGA”***  
**NOVIEMBRE 2016 – JUNIO 2017**

PASCUAL EDUARDO MURILLO ALVARADO

*Profesor – Investigador UCEM*

A través del apoyo otorgado para el desarrollo de este proyecto, se han realizado el uso de los recursos de forma activa, donde ha sido posible realizar las actividades que se tenían programadas, entre las cuales destacan trabajo de campo, en diferentes regiones de Michoacán, así como de los estados de Jalisco y Chiapas, los cuales han aportado información relevante al trabajo que se desarrolla.

A partir del recurso aprobado para el desarrollo de las actividades de reuniones académicas, ha sido posible presentar trabajos en importantes foros tanto nacionales como internacionales, entre los que destacan la asistencia al 2016 AIChE Annual Meeting en la Ciudad de San Francisco, CA., donde se presentó el trabajo en exposición oral titulado “*Optimal supply chain in electric power generation from biogas produce from manure in La Cienega Michoacan.*”. Además, a nivel nacional ha sido posible presentar el trabajo “*Optimización de la Cadena de Suministro para la Producción de Biocombustibles a partir de la Jatropha y Salicornia*” en el Marco del XXXVIII Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, celebrado en la Ciudad de Ixtapa, Gro. Finalmente, se participará en el XVII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, donde se presentara el trabajo “*Optimización de la Cadena de Suministro para la Obtención de Biogás a partir de las Excretas de Ganado en la Región de La Ciénega del Estado de Michoacán*”. La presentación de estos trabajos, reflejan el arduo trabajo que se ha venido realizando a lo largo de este semestre, así como otros trabajos de los alumnos para la formación de recursos humanos, los cuales están abordado estos temas de investigación los cuales enriquecen el desarrollo del proyecto.

En cuanto a los rubros para la adquisición de equipo, materiales y consumibles, y equipo de experimentación, ha sido de gran utilidad, ya que fue posible adquirir elementos de trabajo como equipos de cómputo, licencias de software especializado, proyector y monitor, papel,

tinta de impresión, disco duro, memorias USB, entre otros, los cuales han sido de gran utilidad y facilitan el trabajo a realizar para el desarrollo del proyecto.

Finalmente, en cuanto a la investigación, actualmente se está trabajando en la propuesta del modelo matemático de optimización, esto para el trabajo de producción de biogás, así como, para la generación de biocombustibles a partir de diferentes especies, los cuales son programados en el software GAMS, para los cuales ya se tienen resultados previos. Por lo que la tarea siguiente es la formulación del caso de estudio y en análisis de los datos para la interpelación de los resultados que se obtienen en la solución del modelo matemático. A continuación se presenta un avance del trabajo que se está desarrollando para el caso de la generación de biocombustibles, los cuales pretenden atacar una problemática energética en el estado de Michoacán y a nivel nacional.

## **Avance**

### **Resumen**

Las especies de estudio son la *Jatropha* y la *Salicornia*, debido a su potencial productivo para la obtención de biocombustible (biodiesel y bioturbosina). En México la demanda de turbosina aumentó de 30-50% entre 2010 y 2015, siendo una referencia positiva para la producción de bioturbosina. En lo que concierne al diésel la demanda de este combustible aumenta 2.5% por año debido a que es uno de los combustibles más usados en el sector de transporte. Debido a la creciente demanda es necesaria la implementación de biocombustibles, por lo tanto, para la elaboración de la bioturbosina y biodiesel, se realizarán estudios de caracterización de la *Jatropha* y la *Salicornia*, entre los que destacan estudio meteorológico y de superficie, con la finalidad analizar las regiones del país que cumplan con las mismas condiciones; y conocer el potencial productivo de los estados y municipios.

Por consiguiente, al obtener la materia prima se realizará un estudio a nivel laboratorio para la obtención de los biocombustibles a partir de algunas muestras de *Jatropha* y *Salicornia*, para determinar la eficiencia de conversión de *Salicornia* a bioturbosina e igual de *Jatropha* a biodiesel. Por lo último se plantea un modelo matemático de optimización para determinar la factibilidad de la producción de bioturbosina y biodiesel considerando los aspectos, ambientales, económicos y sociales, a lo largo de la cadena de suministro, desde que se obtiene la materia prima hasta que se envía el producto final, todo este modelo matemático será programado en la plataforma GAMS, utilizando el solucionador CPLEX.

### **Introducción**

En los últimos años, el mundo ha experimentado una serie de transformaciones que ha permitido el desarrollo en todos sus aspectos, por ejemplo, en materia de la industria. Sin embargo, ha descendido en materia ambiental, debido al agotamiento de los recursos energéticos y la contaminación; la cual es provocada por la quema de combustibles fósiles y los gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera en grandes cantidades, provocando con ello que la temperatura media terrestre aumente y, si esta situación se mantiene en el tiempo, se produce lo que denominamos “calentamiento global” y “cambio climático”. Por este motivo, se ha planteado a nivel internacional la necesidad de desarrollar combustibles alternos, que reduzcan las emisiones.

Aunado a esto, la contaminación que genera la turbosina y el gas avión, están provocando un severo problema en el mundo, por emitir gases de efecto invernadero (GEI), lo cual provoca que la temperatura media terrestre aumente y, si esta situación se mantiene en el tiempo, se produce lo que denominamos “calentamiento global” y “cambio climático”, se modifican las condiciones de vida habituales y se ponen en riesgo ecosistemas y especies. Es necesario desarrollar biocombustibles para buscar la alternativa o tratar de reducir las emisiones toxicas que es generada por la turbosina. Con lo cual, se pretende reducir la contaminación por gases de efecto invernadero, ya que la turbosina tiene un cierto impacto con la contaminación aérea, provocando daño en la atmósfera. Además, se busca sustituir al combustible tradicional con la bioturbosina para el uso en los aviones. “La bioturbosina debe reducir la emisión de GEI en más 50% en su ciclo de vida, con respecto a la turbosina. También se espera que, gracias a la tecnología, en el tiempo baje el costo de la bioturbosina mientras, por escasez, suba el del petróleo” (Herrera y Morgan, 2010, citado en Sepulveda, 2012). En la Figura 1, se muestra el ciclo de vida que tiene la bioturbosina desde la obtención materia prima hasta el uso en el transporte aéreo.

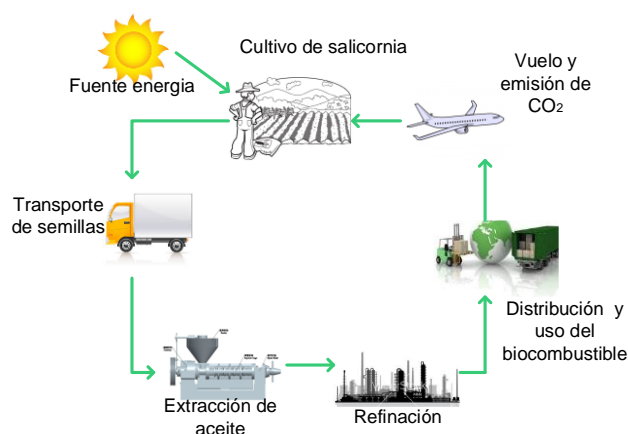


Figura 1.- Ciclo de vida de la salicornia.

En cuanto al uso del diésel, sabemos que el sector del transporte en México depende completamente de combustibles fósiles, principalmente el diésel para transporte de carga pesada. Es importante mencionar que el consumo de estos combustibles constituye el 48% del uso de energía en México, y por lo tanto son fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub>, sin mencionar otros gases contaminantes (Masera, Biodiesel, 2013). En este sentido, el interés energético ha involucrado la búsqueda de alternativas para la producción del biodiesel por medio de plantas oleaginosas, las cuales son vegetales de cuya semilla o fruto puede extraerse aceite, en algunos casos comestibles y en otros casos de uso industrial como alternativa energética (Pavón, 2013), entre la que destaca la *Jatropha*, la cual presenta altos contenidos de aceite, y mediante el proceso de transesterificación se puede obtener el biodiesel, como se muestra en la Figura 2. De acuerdo a sus características biológicas, la *Jatropha* es una planta que puede emerger en tierras poco fértiles y en ambientes secos, por lo cual, no es necesaria la implementación de grandes cantidades de agua para riego. Considerando que consigue crecer en suelos pobres, puede contribuir a la restauración de suelos erosionados. Además al no ser un producto empleado para la nutrición, protege en ciertos aspectos a otros productos que puedan tener un valor comercial. Cabe mencionar, que en ciertos sectores poblacionales del país (Veracruz, Puebla,

Quintana Roo, etc.) se suele emplear la semilla de la *Jatropha* no tóxica como condimento para la elaboración de platillos tradicionales, pero no se ha consolidado dentro de la dieta alimenticia del país. México cuenta con un gran potencial para la producción de Biodiesel por medio de la *Jatropha Curcas* L, y en varios estados del país se le conoce como piñón mexicano (Colomenero, 2012). Por lo que es importante considerar, que por ser una planta nativa del país, es apreciada como una gran alternativa por sus grandes contenidos de aceite. Por lo tanto, al valorar el potencial de esta planta se han creado programas de desarrollo para la implementación y posteriormente la producción de biodiésel, con la finalidad de que diversos organismos se involucren en fomentar la utilización de este tipo de fuente energética, para con ello obtener un beneficio económico, ambiental y social.

Por lo tanto, en este trabajo se abarcará un estudio para determinar la factibilidad de obtención de la bioturbosina y biodiesel, así mismo considerando las condiciones y formas de vida de las materias primas para su obtención (*salicornia* y *jatropha*). Para que el cultivo sea factible de acuerdo a la demanda del biocombustible se toman en cuenta algunas regiones del estado de Michoacán (para el caso de la producción de biodiesel) y a nivel Nacional (para el caso de la obtención de bioturbosina), además determinar los procesos químicos para la obtención del biocombustible. De tal forma que se puedan considerar los aspectos ambientales, económicos y sociales, a través de la cadena de suministro lo cual será determinado mediante en un modelo matemático de optimización.

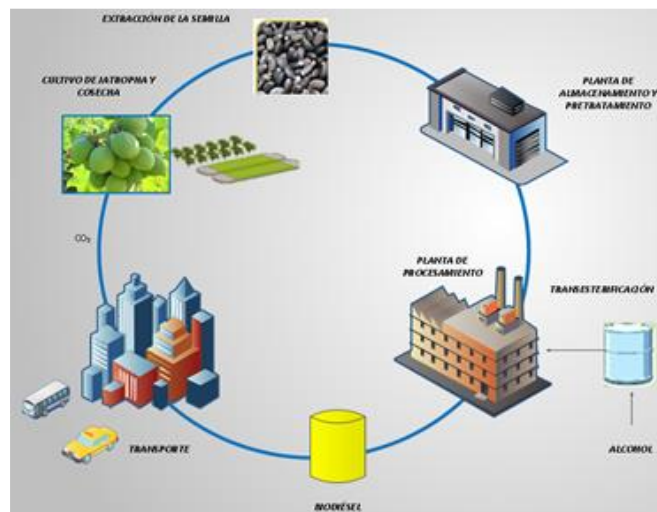


Figura 2.- Ciclo de vida de la obtención de Biodiesel.

Por lo tanto, el interés energético ha involucrado la producción de biocombustibles por medio de plantas oleaginosas o halofíticas, entre la que destaca la *Jatropha* y la *Salicornia*.

Por lo cual, en la investigación se estudiará a nivel laboratorio la forma de obtención de la bioturbosina y biodiesel, así mismo determinar las condiciones y formas de vida de ambas plantas, para que el cultivo sea factible en algunas regiones del país ya que presenta un potencial productivo debido a sus diversos climas y la variedad de tipo de suelo. Al concluir las pruebas de laboratorio se

desarrollará un modelo matemático de optimización para determinar la factibilidad económica sobre el uso de la *Jatropha* en la producción de biodiesel, desde la obtención de la materia prima y los aspectos económicos, ambientales y sociales de la cadena de suministro.

## Metodología

### 1. Estudio y caracterización de la *Jatropha* y *Salicornia*.

La *Jatropha* es una planta resistente a las sequías, a altas temperaturas que van de 18 a 34 °C, la primera cosecha se produce entre los 8 y 12 meses [1]. En lo que concierne a la *Salicornia* es una planta que en su estado adulto es altamente tolerante a la salinidad [2]. Cabe mencionar, que al igual que la *Jatropha* tiene semillas oleaginosas, de las cuales se extraer aceite vegetal para producir biocombustibles. El ciclo de vida de la *Salicornia bigelovii* oscila de 10 a 12 meses, puede llevar su ciclo de vida en diversas concentraciones de salinidad.

### 2. Estudio a nivel laboratorio para la eficiencia de conversión *salicornia* a bioturbosina y de la *Jatropha* a biodiesel.

La extracción del aceite para la producción de Biodiésel y Bioturbosina puede realizarse por dos procesos de tostado o exposición al sol. Por lo tanto, el aceite obtenido puede realizarse por varios métodos, como la transesterificación para la obtención del Biodiésel. Mientras que para la obtención de bioturbosina los procesos son; desoxigenación, isomeración selectiva de craqueo y por ultimo obtener hidrocarburos cíclicos.

### 3. Optimización de la cadena de suministro

En esta parte se propone un modelo matemático de optimización para determinar la factibilidad del uso de las materias primas (*Jatropha* y *Salicornia*), para la producción de los biodiesel y bioturbosina, el modelo determinara la localización de áreas de cultivo, así como también plantas centrales y locales de procesamiento de biomasa, para obtener el producto final que son los biocombustibles ya mencionados. El modelo matemático de optimización propuesta considera la configuración de la cadena de suministro desde que se obtiene la materia prima y hasta su distribución final del producto (biodiesel y bioturbosina), como se muestra en la Figura 3 y Figura 4, toda la configuración va ser considerado desde los aspectos ambientales, sociales y económicos.

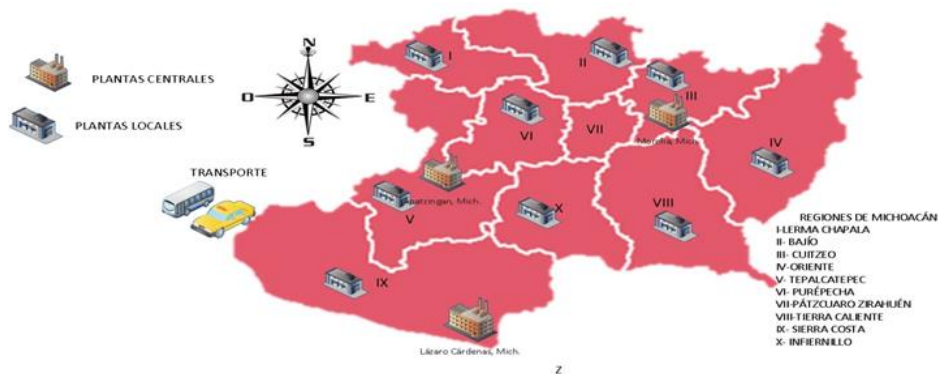


Figura 3.- Caso de estudio para la obtención de Biodiesel.

Es importante mencionar, que en este trabajo se consideran dos casos de estudio, en el primero se determina la factibilidad para el uso de la *Jatropha* en la producción de biodiesel, considerando solo algunas regiones del estado de Michoacán, esto debido a la demanda que se tiene en el estado. Para el segundo caso de estudio se considera determinar la factibilidad de producción de bioturbosina mediante el cultivo de la *Salicornia* a nivel nacional, esto debido a que el estado de Michoacán presenta pocas zonas con las condiciones climáticas para el cultivo de la *salicornia*, además el estado presenta un baja demanda y uso del biocombustible (Bioturbosina) por lo que para este caso, el problema se extiende a nivel nacional. Sin embargo, para el planteamiento del modelo matemático propuesto se considera la misma estrategia, ya que los dos casos consideran una cadena de suministro, desde que se obtiene la materia prima, hasta que se distribuye el producto final, solo presenta cambios en los parámetros de operación y eficiencias de producción. El modelo matemático propuesto será programado en la plataforma GAMS y, se propone un modelo de programación mixto entero lineal, el cual se resolvió utilizando el solver CPLEX.

### Modelo Propuesto

Para el planteamiento del modelo matemático de optimización considera los casos de estudio mostrados en las Figuras 3 y Figura 4. Además, se establecen los siguientes subíndices, el índice  $a$  representa las regiones de cultivo de la materia prima, el índice  $b$  representa las plantas recolectoras de la materia prima, el índice  $c$  se refiere a las plantas centrales de procesamiento, el índice  $d$  se refiere a las plantas distribuidas de procesamiento, que la diferencia respecto a las centrales se basa en que las centrales presentan una mayor capacidad de procesamiento de la materia prima, por lo cual están diseñadas para satisfacer una mayor demanda debido al mayor nivel de producción de biocombustibles. Finalmente el índice  $e$  que representan los mercados que demandan biocombustibles.

El modelo matemático de optimización consta de las siguientes ecuaciones y restricciones.

- La ecuación (1) se considera la disponibilidad de materia prima en cada una de las áreas de cultivo a:

$$FRMaterial_{a,t} \leq FRMaterial_{a,t}^{MAX}, \forall a \in A, t \in T \quad (1)$$

- Para determinar el flujo de materia prima procedente de cada una de las regiones de cultivo a que será enviado a los lugares de procesamiento, se establece la siguiente ecuación (2):

$$FRMaterial_{a,t} = \sum_{b \in B} FBioFuelP_{a,b,t}, \forall a \in A, t \in T \quad (2)$$

- En la siguiente ecuación (3) se establece el flujo total de materia prima que será procesado en las plantas productoras del biocombustible:

$$FTotalBioFuelP_{b,t} = \sum_{a \in A} FRMaterial_{a,b,t}, \forall b \in B, t \in T \quad (3)$$

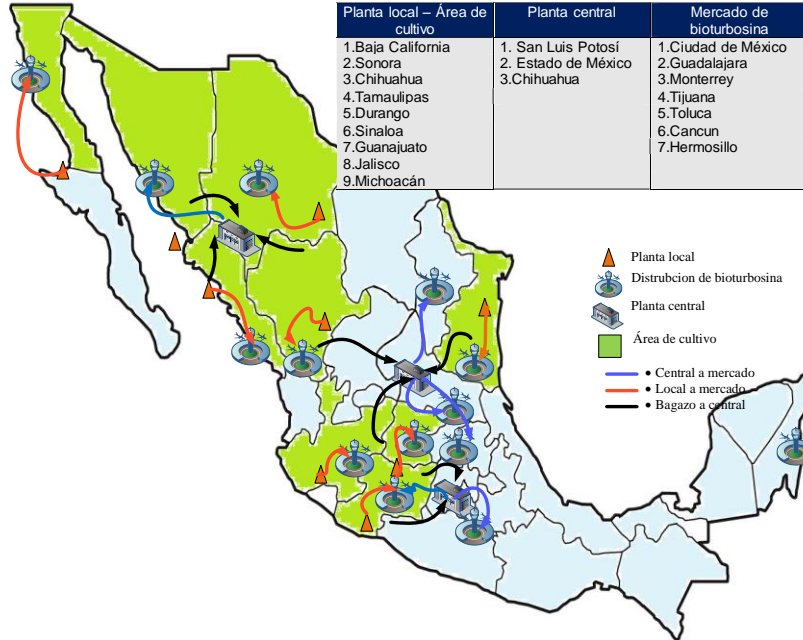


Figura 4.- Caso de estudio para la obtención de Bioturbosina.

- Para determinar el flujo de biocombustible obtenido se establece la siguiente ecuación (4), donde se considera el factor de eficiencia en el proceso de producción de cada planta:

$$FBioFuelPduce_{b,t} = FTtotalBioFuelP_{b,t} \alpha_b, \forall b \in B, t \in T \quad (4)$$

Finalmente, el biocombustible obtenido es enviado a los mercados que presentan demanda del mismo se evalúa mediante la ecuación (5):

$$Market_{m,t} = \sum_{c \in C} BioFuelCent_{c,m,t} + \sum_{d \in D} BioFuelDist_{d,m,t}, \forall m \in M, t \in T \quad (5)$$

- El modelo matemático se basa en maximizar el las ganancias a través de la siguiente ecuación (6):

$$PRFIT = TotalSales - TotalCost \quad (6)$$

Las ganancias evaluadas en la ecuación (6) se determinan mediante las ventas y los costos totales. En los costos totales están involucrados los costos de operación y capital de cada una de las plantas posibles de instalar, así como los costos de transporte de productos y materias primas. En las ventas, se considera las ventas de los productos obtenidos, considerando el factor de venta en el mercado.

## Resultados

El modelo de optimización permite comprender los aspectos de producción del biodiesel y bioturbosina en el estado de Michoacán y a nivel nacional en la producción de bioturbosina. Además, considerando características óptimas para el cultivo de la misma (clima, temperatura, suelo) se establece que se tiene un gran potencial para el uso de estas especies (*Jatropha* y *Salicornia*) como materia prima.

Los resultados tanto de las condiciones de cultivo como de los lugares posibles de instalación de las plantas de procesamiento establecen que es posible obtener beneficios en los aspectos sociales, económicos y ambientales, creando empleos, plantas de industrias, y contribuir con el medio ambiente, disminuyendo el calentamiento global y el cambio climático, así tener nuevas fuentes de energías alternativas.

Respecto a la obtención de biocombustibles a través de estas especies es posible satisfacer entre un 3.2 -3.8 % la demanda total de diésel en el estado de Michoacán, lo cual es un beneficio ambiental significativo, debido a la disminución de contaminantes. En cuanto a la obtención de bioturbosina, se presenta un porcentaje menor (1.8 – 2.4 %) de la demanda nacional de este combustible, debido a que actualmente se presenta un crecimiento exponencial en la demanda de este combustible. Sin embargo, es posible reducir en cierto porcentaje los niveles de contaminación, adoptando fuentes alternas para la obtención de combustibles sin recurrir a fuentes o especies que se encuentran dentro de la dieta alimenticia.

## Conclusiones

El País cuenta con el potencial para el cultivo de la *Jatropha* y la *Salicornia*, en lo que concierne a los estados y las regiones. Con la creación de la bioturbosina y el biodiesel, se reduce la demanda de combustibles fósiles (diésel y turbosina), y las emisiones de gases de efecto invernadero. El estudio permitirá que la producción del biodiesel y bioturbosina en el país se incremente y pueda ser utilizado en las regiones con más demanda de combustible y por consiguiente reducir la dependencia de los combustibles fósiles y ser más amigable con el ambiental.

## Referencias

1. Masera, O. (2013). *Biodiésel* (Vol. 1). México, D.F., México: TERRACOTA.
2. Terrence, E., Ungar, I, "Growth and ion accumulation in *Salicornia* Europea under saline field conditions", *Oecologia*, No 54:193-199, 1982

El apoyo otorgado para este proyecto ha permitido realizar y abordar temas de investigación de gran interés a nivel académico, así como a nivel regional, ya que se abordan temas innovadores y con la finalidad de atender problemas actuales, y la finalidad es encontrar una solución que considere aspectos tanto económicos, ambientales y sociales, ya que son los principales objetos de estudio en la actualidad.