



**Universidad Nacional Autónoma de  
México**

**Facultad de Ingeniería**

**División de Estudios de Posgrado**

***Análisis de Ciclo de Vida para el Etanol:  
Caso de Estudio Ingenio Tamazula***

**Tesis**

**Para obtener el grado de:**

**Maestro en Ingeniería**

**(Ingeniería Industrial)**

**Presenta:**

**Aureliano Javier Manríquez García**

Dirigida por:

Dr. Arón Jazcilevich Diamant

M.I Ann Wellens Purnal



## **Integrantes del Jurado:**

**Presidente: M.I. Soler Anguiano Francisca Irene**

**Vocal: Dra. Flores De La Mota Idalia**

**Secretario: M.I. Wellens Purnal Ann**

**1er. Suplente: Dr. Jazcilevich Diamant Aron**

**2do. Suplente: Dra. Cervini Silva Javiera**

## Agradecimientos:

Al proyecto PINCC-UNAM: “Producción de etanol en México a partir de la caña de azúcar y su efecto en la emisión de energía” que forma parte del proyecto “Biocombustibles en México: una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y para la mitigación de los gases efecto invernadero”.

Al proyecto PICS08-31 del Instituto de Ciencia y Tecnología del D.F.

Al Dr. Arón Jazcilevich Diamant, por su apoyo y consejos para la elaboración de este proyecto.

A la Dra. Javier Cervini Silva, por su aportación al desarrollo de este proyecto.

Al Ingenio Tamazula en especial al Ing. Roberto Rangel García, por su interés y disponibilidad en el desarrollo de la investigación de campo.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Argonne National Laboratory – Transportation Technology R&D Center en especial a Andy Burnham.

## Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>7</b>
I. Justificación del proyecto .....	7
II. Objetivo.....	8
III. Objetivos específicos .....	8
IV. Metas.....	9
V. Alcances y limitaciones .....	9
<b>Capítulo 1: Biocombustibles</b> .....	<b>11</b>
1.1 Biocombustibles .....	12
1.1.1 Perspectiva de los biocombustibles en el mundo .....	12
1.1.3 Comunidad Económica Europea.....	15
1.2 Perspectiva de los biocombustibles en México .....	15
1.2.1 Etanol .....	15
1.2.2 Biomasa con potencial para producción de etanol .....	16
1.3 Demanda de Gasolinas Comercializadas en México .....	17
<b>Capítulo 2: Modelación del ciclo de vida</b> .....	<b>21</b>
2.1 Concepto de análisis de ciclo de vida (ACV) .....	22
2.2 Estandarización del ACV.....	24
2.2.1 Objetivo y alcance del estudio.....	25
2.2.2 Inventario.....	26
2.2.3 Análisis del impacto.....	27
2.2.4 Interpretación del ciclo de vida.....	28
2.3 Modelos para simular el ACV de biocombustibles .....	28
2.4 Selección del modelo LCA más adecuado para México y sus requerimientos... 30	
2.5 Generalidades del modelo GREET.....	31
2.5.1 Desarrollo del modelo .....	31
2.5.2 GREET 1.8.....	32
2.5.3 GREET 2.7 .....	33
<b>Capítulo 3: Metodología</b> .....	<b>34</b>
3.1 Selección del caso de estudio .....	35
3.2 Fronteras del sistema .....	37
3.3 Generación de datos de entrada para el modelo GREET .....	38
3.3.1 Fertilizantes .....	39
3.3.2 Herbicidas e insecticidas .....	39
3.3.3 Cosecha de la caña y quema a cielo abierto .....	40
3.3.4 Transporte de los campos de cultivo al ingenio Tamazula .....	42

3.3.5 Producción de alcohol en la fábrica .....	43
3.3.6 Energía requerida en la planta .....	44
3.3.7 Bagazo .....	46
3.3.8 Transporte del ingenio al centro de mezclado .....	47
3.3.9 Generación e importación de energía eléctrica .....	47
3.3.10 Transporte del etanol del Ingenio Tamazula al centro de mezclado .....	48
3.4 Escenarios comparativos .....	49
<b>Capítulo 4: Resultados .....</b>	<b>51</b>
4.1 Generalidades .....	52
4.2 Balance de energía .....	52
4.3 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) .....	56
4.3.1 Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	56
4.3.2 Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	57
4.3.3 Óxido de nitrógeno (N <sub>2</sub> O) .....	58
4.4 Balance de emisiones de GEI .....	59
4.5 Compuestos orgánicos volátiles (VOC) .....	60
4.6 Monóxido de carbono (CO) .....	61
4.7 Óxidos nitrosos (NO <sub>x</sub> ) .....	62
4.8 Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ) .....	63
4.9 Partículas en suspensión PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	64
<b>Capítulo 5: Conclusiones .....</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>68</b>
<b>Anexo I: Ley de biocombustibles .....</b>	<b>70</b>
1. Países que se comprometieron en el protocolo de Kioto a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. ....	70
2. Capacidad instalada para producir alcohol de los ingenios azucares más importantes en México. ....	71
3. Puntos importantes de la ley de promoción y desarrollo de los Bioenergéticos ...	72
<b>Anexo II: Modelo GREET .....</b>	<b>75</b>
Modelo GREET .....	75
Calculo de las emisiones para cada etapa del ciclo de combustible .....	76
<b>Anexo III: Proceso de producción del etanol .....</b>	<b>79</b>
1. Proceso de producción de etanol a través de la caña de azúcar .....	79
1.1 Limpia del terreno .....	79
1.2 Rastreo .....	80
1.3 Nivelación .....	80

1.4 Subsulado.....	80
1.5 Surcado .....	81
2. Siembra y variedades de caña .....	81
2.1 Siembra de la caña .....	81
2.3 Riego .....	82
2.4 Cosecha de la caña.....	83
2.5 Transporte al ingenio.....	84
3. Proceso en ingenio.....	85
3.1 Acondicionamiento .....	85
3.2 Proceso en la fábrica de alcohol .....	85
3.3 Separación y deshidratación .....	86
3.4 Tratamiento de efluentes.....	86
3.5 Almacén y transporte .....	87
<b>Anexo IV: Premios y participaciones .....</b>	<b>88</b>

# Introducción

## I. Justificación del proyecto

Los biocombustibles son una fuente de energía derivada de materia orgánica. Éstos combustibles pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos. En el caso del etanol, se trata de un biocombustible líquido y sus principales materias primas son la caña de azúcar y el maíz.

En la actualidad el mayor porcentaje de biocombustibles líquidos se emplea en el sector autotransporte. Sus funciones son sustituir al Eter Metil Terbutílico (MTBE, por sus siglas en inglés) como oxigenante, utilizar energías renovables sustitutas del petróleo y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), durante el proceso de producción y durante su utilización. En el caso particular de Brasil, que ha creado una de las industrias más importantes de etanol derivado de la caña de azúcar, ha utilizado diversas mezclas de etanol-gasolina (E5, E10, E20, *etc.*), hasta llegar a utilizar un cien por ciento de etanol (E100) en vehículos flex-fuel, a un precio competitivo con respecto al de la gasolina mineral.

Por otra parte, se ha generado una discusión a nivel mundial sobre la viabilidad en el uso de biocombustibles líquidos para el sector autotransporte, ya que no se han determinado con exactitud sus efectos a mediano y largo plazo como mitigante de emisiones de GEI y como fuente de energía sustentable a largo plazo.

Esto ha motivado la realización de diversos estudios para medir los efectos actuales y a largo plazo en el medio ambiente por el proceso de fabricación (well-to-pump) y por el proceso de uso (pump-to-wheels) de los biocombustibles, en el contexto de las nuevas tendencias globales en mitigar las emisiones de GEI de acuerdo con protocolo de Kioto de 1997.

El modelo Gases de Efecto Invernadero, Regulación de Emisiones y Uso de Energía en el Transporte (GREET, por sus siglas en inglés), es uno de los modelos más amplios que se han diseñado por el Departamento de Energía de

los Estados Unidos. Respetar las normas ISO 14000, y simular los procesos de fabricación y uso de diversos biocombustibles y combustibles convencionales.

Con el modelo GREET se pueden comparar diferentes fuentes de energía y por diversos procesos de fabricación tanto de vehículos como de combustibles. Para el estudio que aquí se presenta, se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), tomando en cuenta el proceso de fabricación (well-to-pump) de etanol, para un caso de estudio específico: El ingenio azucarero Tamazula, ubicado en el estado de Jalisco.

En México se han realizado diversos estudios de ACV de etanol, entre los que destacan los realizados por el Centro Mario Molina (CMM) y por el Centro de Investigación en Energía (CIE, UNAM). Sin embargo, en ambos estudios han utilizado modelos que no cuentan con un módulo de simulación en donde se utilice la caña de azúcar como materia prima, además de que no se ha incluido el transporte en el proceso de fabricación y la mayoría de los datos se basan en informes bibliográficos. Los de este proyecto se basan en su mayoría en estudios de campo.

## **II. Objetivo**

Realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso de fabricación de etanol a partir de caña de azúcar de un caso de estudio representativo de México (ingenio Tamazula), utilizando el modelo GREET.

## **III. Objetivos específicos**

- Establecer los balances de energía en las diferentes etapas del proceso de producción de etanol a partir de caña de azúcar.
- Establecer las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en las diferentes etapas del proceso.

## IV. Metas

- Adaptar el modelo GREET a la producción de alcohol en el ingenio Tamazula.
- Recopilar información del proceso de fabricación del alcohol en el ingenio Tamazula en campo y en la literatura.
- Introducir los datos de entrada que requieren el modelo, para realizar el ACV.
- Hacer un comparativo entre la producción en México con las producciones en Brasil y E.U.
- Identificar los puntos críticos de la producción actual de alcohol en el ingenio Tamazula y presentar un escenario en donde se realicen las mejoras al proceso de producción.

## V. Alcances y limitaciones

El ACV que se presenta en este proyecto, ha tomado en cuenta las etapas de preparación del suelo, aplicación de fertilizantes, cosecha de la materia prima, transporte de los campos de cultivo al ingenio, procesos de fabricación, generación de energía eléctrica a través del bagazo, compra de energía eléctrica a Comisión Federal de Electricidad (CFE) y transporte del ingenio al centro de distribución. Hay que aclarar que en el caso de la última etapa, se ha hecho el supuesto de que existe un centro de distribución, ya que en la actualidad el alcohol que se fabrica tiene como uso final el consumo humano y la industria farmacéutica, por lo que se incluye un escenario de distribución en el sector autotransporte.

El modelado del proceso industrial ha tomado en cuenta la fabricación de los equipos de producción, la construcción del ingenio y la fabricación de los equipos de transporte, aunque no ha tomado en cuenta el cambio de uso de suelo. Esta situación se ha descartado a priori porque se considera en la literatura contraproducente en el balance de emisiones de GEI.

Por lo anterior se procedió a realizar visitas a campo y fábrica del ingenio Tamazula, con la finalidad de obtener información y generar un inventario de datos de entrada identificando los problemas que presenta dicho ingenio. Con la información recopilada en diversos departamentos de ingeniería del ingenio Tamazula, se procedió a realizar un análisis de cada uno de los datos proporcionados, y en algunos de los casos se utilizaron valores promediados, provenientes de los estudios previamente realizados. Por otra parte se procedió a adecuar la información para los datos de entrada que necesita el modelo GREET.

Los resultados, que se han obtenido usando el modelo GREET, corresponden a los escenarios de Tamazula A el cual requiere energía eléctrica procedente de CFE y Tamazula B, el cual cuenta con autonomía energética.

Se logró obtener resultados en cuanto a:

- La energía total, energía renovable y no renovable del proceso de producción.
- Emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ), compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, óxidos nitrosos,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y óxidos de azufre, durante cada etapa del proceso.

También se hace una comparación de los resultados para Tamazula A y B con el caso de la fabricación de etanol con azúcar en Brasil y con maíz en los EEUU. En dicha comparación se muestran las ventajas y desventajas del uso de energías renovables y no renovables.

# **Capítulo 1: Biocombustibles**

## 1.1 Biocombustibles

Los biocombustibles son alcoholes, éteres, esteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) que se extraen de plantas silvestres o de algún cultivo; pueden encontrarse en estado sólido, líquido, o gaseoso. En particular, los biocombustibles líquidos, también denominados biocarburantes, son productos que se emplean como sustitutos del diesel y de la gasolina (Agronegocios *et al.*, 2008). El etanol, el biodiesel, el metanol, entre otros, son ejemplos de biocombustibles.

### 1.1.1 Perspectiva de los biocombustibles en el mundo

La influencia de la actividad humana sobre el calentamiento global a través de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) destaca entre una de las razones principales para encaminar esfuerzos hacia un aprovechamiento eficaz de los recursos energéticos. El fin último es extender la disponibilidad de combustibles no renovables como los fósiles y la reducción en las emisiones de GEI. En el contexto del Protocolo de Kyoto, la gran mayoría de los países desarrollados se han comprometido a reducir el promedio de emisiones de GEI durante para el periodo 2008-2012, por lo menos en un 5% respecto a los niveles emitidos en 1990. Pese a que en el Protocolo de Kyoto los países pertenecientes al Anexo I se comprometen a cumplir con sus metas de reducción de emisiones, se estima que en los próximos años una mayor cantidad de países asuma este compromiso global con el cambio climático. En este sentido, se auguró que dada la creciente preocupación mundial por el calentamiento global, se tendrá repercusiones favorables en aras de una mayor producción y utilización de energías renovables. En este sentido, en las últimas dos décadas ha existido una tendencia mundial a sustituir el petróleo por fuentes alternativas de energía; en particular, se observa una tendencia en el aumento en el uso de energía nuclear y de gas natural en la generación de energía eléctrica (IEA *et al.*, 2010). A nivel regional, la producción de biocombustibles en especial etanol, está dominada por Brasil (caña de azúcar) y EE.UU. (maíz).

### 1.1.2 Continente americano

En la figura 1 se muestran los resultados del año 2007 y 2008 de los principales países productores de etanol. Un punto importante es que la producción de etanol de los países líderes en la producción de dicha fuente de energía incrementó la producción de un año a otro. Esta tendencia se muestra con los demás participantes. Brasil es la segunda potencia mundial en la producción de etanol con 24,465 millones de litros en 2008. La competitividad de Brasil en la producción de etanol se atribuye al uso de caña de azúcar como insumo: Brasil es líder mundial de producción de caña de azúcar y aporta el 37% de la producción mundial. Más aun, desde la década de los setenta el gobierno de Brasil promovió el programa nacional Pro-alcohol utilizando la caña de azúcar para producir etanol. De esta manera fue como se comenzó a utilizar en gran escala la mezcla etanol- gasolina.

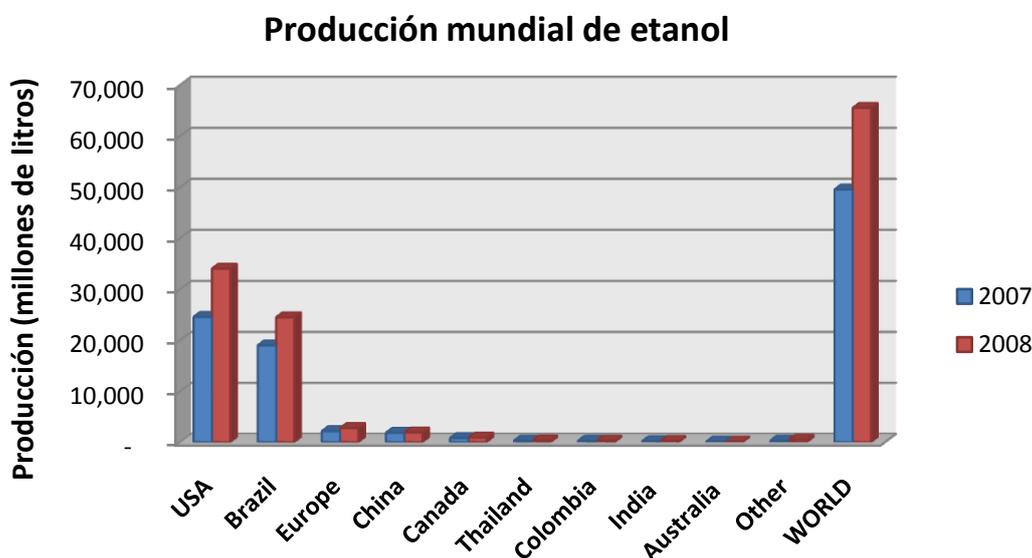


Figura 1: producción de etanol a nivel mundial. Fuente [www.afdc.energy.gov/afdc/data/](http://www.afdc.energy.gov/afdc/data/), marzo 2011.

El mercado brasileño ha crecido de tal forma que en 2005 el mercado local de etanol en Brasil ha crecido de tal forma que en 2005 se vendieron más automóviles adaptados para funcionar con etanol que vehículos

convencionales de gasolina. De esta forma, se calcula que 5 millones de vehículos se mueven exclusivamente con alcohol, y otros tantos lo hacen con mezcla de gasolina y etanol, constituyendo un total aproximado de 10 millones de vehículos utilizando como combustible etanol. Se estima que se cuenta con unas 30,000 estaciones de servicio que proveen etanol y gasolina a los automovilistas.

Estados Unidos es el líder mundial en este sector con una producción de cercana a los 34,020 millones de litros de etanol en 2008, misma que se obtiene principalmente a partir del procesamiento de maíz (Wang M. *et al.*, 2007). Al igual que Brasil, Estados Unidos utiliza su ventaja productiva de dicho insumo, ya que en 2008 se colocó al frente de este rubro en escala mundial. En la actualidad, en Estados Unidos se ha sustituido casi el 2 % de su gasolina por etanol, el cual se emplea en mezclas con gasolina, generalmente al 10 %. El gobierno estadounidense, tanto a nivel estatal como federal, ha estado impulsando el desarrollo de los mercados de energía renovable, a través de incentivos fiscales y mandatos. La producción de etanol en ese país se incrementó más de 120 % en el periodo del 2001 al 2005; mientras que la producción de biodiesel fue nueve veces mayor en el 2005, respecto a los niveles de producción del 2001. La ley de política energética estadounidense pide que para el 2012 se utilicen 7,500 millones de litros de biocombustibles en los vehículos de motor, garantizando con esto la demanda de la producción de etanol. En los Estados Unidos el "Energy bill" estableció el uso de 4.5 billones de galones de etanol para el 2006, el cual se obtuvo a partir de 42 millones de toneladas de maíz. En 2006, el uso de maíz para la producción de etanol en Estados Unidos se incrementó en 24 %. Sin embargo, un año después (2007), el incremento en la producción de etanol pasó a 5.6 billones de galones de etanol. Por dichas tendencias se espera que en el año 2011 la producción de este biocombustible sea de 11 billones de galones, lo que representaría un incremento de 6.5 billones de galones con respecto al año 2006 (Baker A. *et al.*, 2010).

### 1.1.3 Comunidad Económica Europea

La Unión Europea ha desarrollado un programa de fomento para promover el uso de energías renovables denominado ALTENER (programa plurianual de fomento de las energías renovables) (ALTENER *et al.*, 2000). El objetivo de dicho programa es contribuir al aumento en el consumo de energías renovables. Por lo que forma parte de una estrategia comunitaria y plan de acción, para acelerar la introducción en el mercado de fuentes de energía renovables y fomentar la inversión pública y privada en la producción de las mismas.

El programa ALTENER se focaliza en acciones de investigación, aplicación de programas piloto, medidas de fomento y difusión, programas locales, regionales y globales, así como a acciones específicas y focalizadas. Entre dichas acciones específicas se encuentran las siguientes:

1. Incrementar la participación del mercado de energías renovables desde el 4% al 8% de las necesidades energéticas primarias.
2. Triplicar la producción de energías renovables.
3. Asegurar una participación de los biocombustibles en el consumo total de combustibles por los vehículos del orden del 5%.

## 1.2 Perspectiva de los biocombustibles en México

### 1.2.1 Etanol

De acuerdo con estudios realizados por la Secretaría de Energía (Masera C. *et al.*, 2006), México cuenta con oportunidades de producción de etanol a gran escala. Dicha producción se puede obtener a partir de las siguientes materias primas: caña de azúcar, maíz, trigo y sorgo. Sin embargo, en los casos del maíz, trigo y sorgo, se cuenta con un déficit en la producción interna, por lo que se ha tenido que importar 6 millones de toneladas de maíz, 3.7 millones de toneladas de trigo y 2.9 millones de toneladas de sorgo, y de acuerdo con

estimaciones del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), existe una tendencia a incrementar las importaciones de dichos granos.

Por el contrario en el caso de la caña de azúcar existe un superávit en la producción interna. Aunado a lo anterior, existen 58 ingenios azucareros, procesando la caña cosechada en 612 mil hectáreas y produciendo cerca de 5 millones de toneladas de azúcar por año. Una parte importante de estos ingenios posee destilerías alcoholeras, con una capacidad instalada para producir 89,250 millones de litros de alcohol (ver anexo I). Sin embargo, en los últimos años la producción de alcohol ha disminuido considerablemente. Datos correspondientes al periodo de producción de caña de azúcar denominado zafra del año 2002/2003 (UNC *et al.*, 2006), indican que 1.8 millones de toneladas de melazas se utilizan principalmente para la producción de alcoholes, por lo que se estima que la producción de alcohol durante la zafra 2002/2003 fue de 39 millones de litros de alcohol. Sin embargo, para el periodo de zafra 2007/2008, estos mismos ingenios sólo produjeron 19,427 millones de litros, debido a que se concentraron en la producción de azúcar.

Por lo tanto, al implementar una adecuada política de incentivos en la producción de alcohol carburante, se podrá reactivar la producción de alcohol y así mismo la modernización de las destilerías actuales.

### **1.2.2 Biomasa con potencial para producción de etanol**

La participación de la biomasa en la producción de energía primaria en el país tiene un aporte inferior al 4%. Dentro de la energía utilizada como biomasa se tiene considerada la leña y bagazo de caña. La primera se utiliza como combustible en casa habitación y la segunda en los ingenios como co-producción de energía eléctrica para el funcionamiento del ingenio. En este caso existe un potencial en la producción de este biocombustible a partir de biomasa. El único problema es que actualmente la tecnología para este fin, todavía se encuentra en etapa de investigación y desarrollo y no se ha escalado para fines comerciales.

Por lo tanto, a corto plazo el cultivo que se merece mayor atención para la producción de etanol es la caña de azúcar, sin dejar de invertir en investigación y desarrollo a futuro, en la transformación de la biomasa (UNC *et al.*, 2006).

### 1.3 Demanda de Gasolinas Comercializadas en México

De acuerdo con informe anual 2009 sobre consumo de energéticos, proporcionado por Petróleos Mexicanos (PEMEX) (Masera C. *et al.*, 2006), el principal energético derivado del petróleo son las gasolinas automotrices (ver figura 2); esto constituye alrededor de 792 mil barriles diarios: en segundo lugar se encuentra el diesel, con 382 mil barriles diarios. Por otra parte, la producción principal de estos dos combustibles se encamina a cubrir las demandas del sector automotriz.

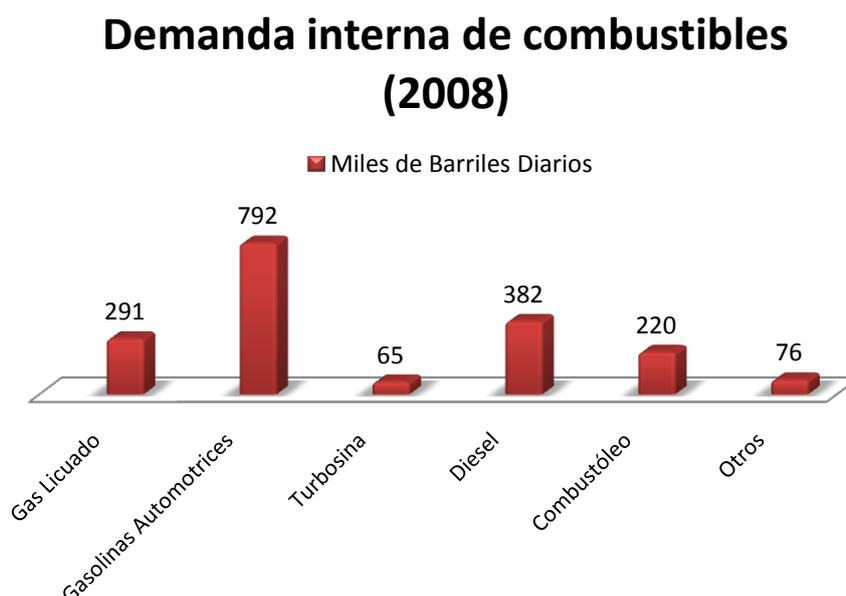


Figura 2. Demanda Interna de Combustibles. Fuente [www.ri.pemex.com](http://www.ri.pemex.com), diciembre de 2010.

Aunado a la información precedente, los datos referentes al historial de la demanda de gasolina (figura 3), se augura un incremento en la demanda de energéticos por parte del sector automotriz en años subsecuentes. Al mismo tiempo, se reporta una disminución en las reservas petroleras en los últimos años (figura 4), con lo cual México pudiera convertirse en importador de petróleo (Masera C., *et al.*, 2006).

Por lo anterior, si se implementa una política de producción de biocombustibles, éstos pueden contribuir al ahorro de millones de barriles de petróleo y por lo tanto disminuir el declive de las reservas petroleras en un mediano plazo y a la vez se disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

### Historial de la demanda de gasolina

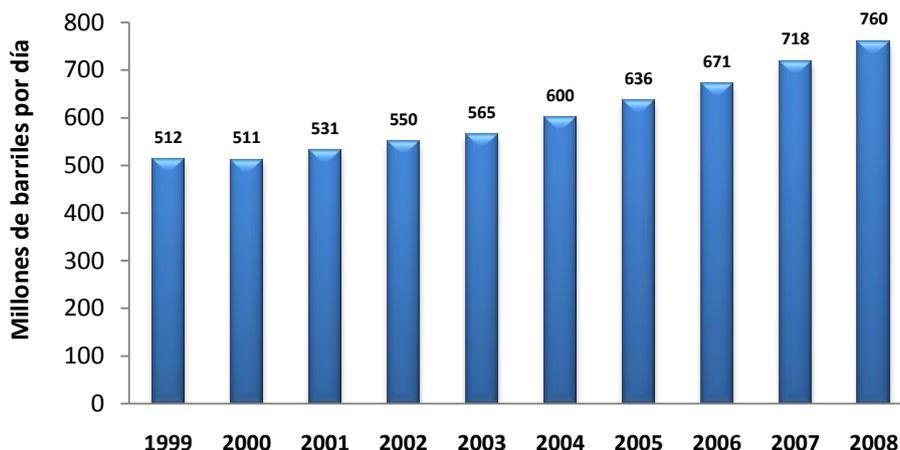


Figura 3. Historial de la demanda de gasolina. Fuente [www.ri.pemex.com](http://www.ri.pemex.com), diciembre de 2010.

### Reservas de petróleo probadas (Mb)

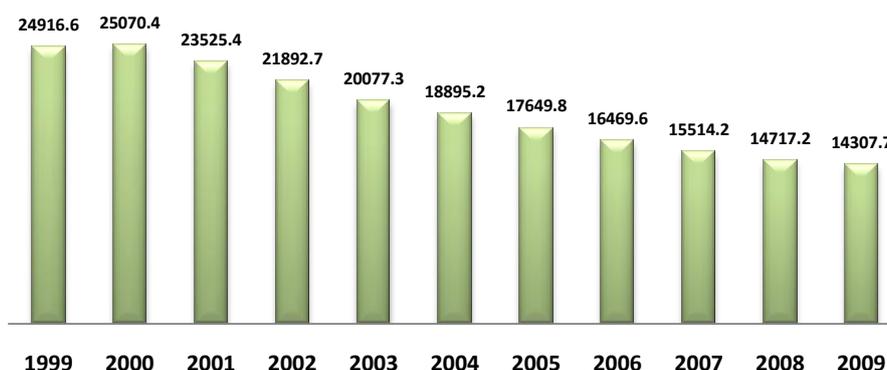


Figura 4. Historial de Reservas Petroleras para México. Fuente [www.ri.pemex.com](http://www.ri.pemex.com), diciembre de 2010.

Si bien el desarrollo de los biocombustibles en el mundo ha tenido un avance significativo, desde los años 70's, en México prácticamente es nulo. La infraestructura con la cual cuenta el país para obtener etanol a partir de la caña de azúcar está destinada primordialmente a la industria licorera. Pese a lo

anterior, existen esfuerzos en varias entidades de educación superior del país en conjunción con instancias gubernamentales para promover un desarrollo sustentable a nivel nacional, en el que los bioenergéticos juegan un papel importante. En este sentido, se tiene como referente importante la Ley acerca de promoción y desarrollo de los bioenergéticos publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de Febrero de 2008 (SENER *et al.*, 2008). Ésta promueve la producción de insumos, para que éstos sean transformados en bioenergéticos, se involucra a la Secretaría de Energía (SENER) y la SEMARNAT, como órganos reguladores en el impacto ambiental a lo largo de la cadena de suministro (ver Anexo I).

### 1.3.1.1 Etanol

Como se ha visto en el punto 1.3, en México la mayor demanda de combustibles en el año 2008 (*figura 2*) estuvo dirigido al sector autotransporte; por consecuencia, la gasolina y el diesel, fueron los combustibles con mayor demanda. En la actualidad la gasolina que se utiliza en México, cuenta con un aditivo oxigenante conocido como methyl tertiary butyl ether (MTBE por sus siglas en inglés), dicho oxigenante propicia que el octanaje de los hidrocarburos se incremente hasta en tres veces. El porcentaje que se maneja en promedio mundial de éste aditivo es del orden del 15 % del volumen de la gasolina (Schifter *et al.*, 1998). Sin embargo, en diversos estudios, se han encontrado restos de MTBE en los acuíferos. Esto se debe a que los tanques que contienen la gasolina en las estaciones de servicio son subterráneos, y por las condiciones de humedad, este compuesto químico se ha filtrado a la tierra. Esto ha causado que en diversos países se busque una alternativa en los oxigenantes de las gasolinas, una alternativa es el ETBE, que no es más que éter de etanol, o mejor conocido como etanol.

Con base en la discusión precedente acerca de la situación del abastecimiento de combustible en México y en el mundo, se prevé factible la implementación de un programa federal en el que el etanol sea empleado como combustible en aras de un proceso de transición para el desarrollo de sistemas

de transporte que promuevan un desarrollo sustentable. En este sentido, no es de esperarse que el combustible etanol desplace completamente a la gasolina del mercado en ningún momento. Por el contrario, se estima que el empleo de etanol coadyuvará a extender el tiempo de vida media de los recursos petrolíferos y de esta forma lograr una cuota moderada de mercado y racionalización de los recursos asociados con la gasolina (Irastorza V. *et al.*,2007).

# **Capítulo 2:**

# **Modelación del ciclo de**

# **vida**

## 2.1 Concepto de análisis de ciclo de vida (ACV)

El ciclo de vida de un producto considera toda la “historia” del producto, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo. Se toma en cuenta todas las fases intermedias, como: transporte, preparación de las materias primas, manufactura, mercado, distribución final, entre otras (*figura 5*) (García L. *et al.*,2004) . En la actualidad las empresas se han enfocado a observar el comportamiento ambiental que tienen sus productos o servicios, esto se debe a la presión que se tiene por las nuevas legislaciones y normas ambientales, así como la influencia que se tiene a lo largo de la cadena de suministro. Por otra parte, los consumidores con conciencia ecológica demandan productos con una alta eficiencia y los combinan con la ventaja de tener un menor costo monetario por un adecuado rendimiento ambiental. En consecuencia, un fabricante o prestador de servicios inteligente y responsable, debe tratar de desarrollar productos que puedan comercializarse en un contexto de un mejor desempeño ambiental (García L. *et al.*,2004). Esta estrategia puede permitir a la empresa, obtener una ventaja de mercado frente a sus competidores.

El análisis de ciclo de vida (ACV) (INCOMIA *et al.*,2007), es un instrumento eficaz para informar a la dirección acerca del rendimiento ambiental de la empresa, mejorar el impacto ambiental de sus productos e identificar los ahorros en costos asociados con la fabricación y los métodos de eliminación de residuos. El interés del ACV debe de ser del interés de las empresas más allá de su tamaño o de los productos que ofrecen.

Un ejemplo de un típico ciclo de vida (CV), es la producción de automóviles convencionales (*figura 5*). Este proceso parte desde la extracción de la materia prima, hasta el reciclado del mismo, durante este proceso, existe consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), costos económicos, etc.



Figura 5. Ejemplo de ciclo de vida de la producción de automóviles.

El ACV difiere fundamentalmente de otros instrumentos de gestión ambiental, como por ejemplo sistemas de “evaluación de impacto ambiental”. La problemática que existe al utilizar herramientas como la creada por Warner y Bromley en 1974 y/o la creada por Center y Sadler en 1997, es que ninguna satisface la variedad y tipo de actividades que intervienen en un Ciclo de Vida como el que se ejemplifica en la figura 5. Dichas herramientas, aunque cuentan con listas de chequeo, matrices y diagramas, solo se aplican a una etapa del ciclo de vida, por lo que no se obtienen resultados del sistema completo y hay que obtenerlos por cada etapa. Esto dificulta la obtención de datos e interpretación de resultados (Delucchi A. *et al.*,2007).

En contraparte el ACV, se va integrando a cada una de las etapas del ciclo de vida y si se agrega una etapa intermedia más, cuenta con la flexibilidad de incluirla en el estudio final. Así también toma en cuenta los sitios geográficos en donde se desarrollan las diferentes etapas que conforman el proceso de producción. La implementación de esta metodología elimina el (los) cambio(s) de impacto ambiental en alguna de las etapas del ciclo de vida. Algunas consideraciones, por ejemplo, consideran que aun cuando existe la posibilidad de emplear en el proceso de producción materiales que conllevaran un impacto

ambiental menor, en algunas ocasiones implican un impacto ambiental mayor una vez que se consideran los procesos de su extracción o bien su eliminación.

## 2.2 Estandarización del ACV

Hoy en día, existen esfuerzos internacionales para simplificar los sistemas de ACV en aras de crear una herramienta más robusta y, al mismo tiempo, poder contar con la posibilidad de desarrollar una metodología estándar. En este sentido, la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) (Delucchi A. *et al.*,2007), ha desarrollado una serie de normas con el objetivo de crear una metodología adecuada para la evaluación e interpretación del sistema. En particular, en la norma ISO 14040 (ISO 1440 *et al.*,2006) se desarrolla un marco general orientado a obtener los requerimientos y los principios sobre el análisis de ciclo de vida (ACV). Sin embargo, en la norma no se describe la técnica de evaluación a detalle. Por este motivo es que fue creada la norma ISO 14041 (ISO 1440 *et al.*,2006), la cual es más específica en los requerimientos y los procedimientos necesarios para la elaboración, la definición del objetivo y de los alcances relacionados con el ACV. La norma ISO 14041 propone una optimización metodológica para el manejo de datos que se ve reflejada en la en la realización mismo, en la interpretación de datos, o bien en la presentación de informes, de acuerdo a como se describe a continuación:

Aunque el ACV se puede dividir en múltiples etapas, comúnmente se divide en cuatro etapas:

1. Definición del objetivo y el alcance del ACV.
2. *Análisis de inventario*, que consiste en compilar un inventario de entradas y salidas pertinentes al sistema del producto.
3. *Análisis de impacto*, que consiste en evaluar los impactos ambientales potenciales.
4. Interpretación, que consiste en un análisis de los resultados obtenidos en los puntos 2 y 3 para la optimización de procesos.

Tal y como se ilustra en la figura 6, estas cuatro fases no son simplemente secuenciales: el ACV es una técnica iterativa que permite incrementar el nivel de detalle en iteraciones sucesivas dentro de los procesos industriales de complejidad creciente.

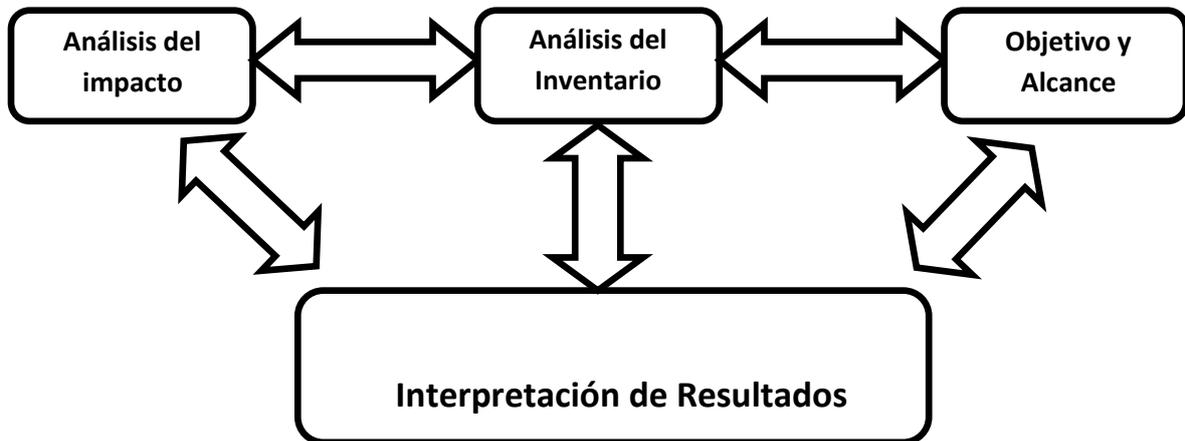


Figura 6. Fases del Ciclo de Vida, de acuerdo con ISO 14040.

Las normas no prescriben una metodología. Las normas están destinadas a proporcionar información sobre la forma más adecuada para desarrollar y revisar la calidad de los datos, con el fin de obtener una interpretación adecuada de los resultados finales (ISO 1440 *et al.*, 2006).

### 2.2.1 Objetivo y alcance del estudio

La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado (ISO 1441 *et al.*, 2007). Un ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino más bien servicios y/o cantidades de producto que se empleen para desarrollar una acción similar y cumplir un objetivo afín. Por ejemplo, no es válido comparar ACVs para dos kilos de pintura de una marca distinta que no sirvan para realizar la misma función. El criterio pudiera ser, entre otros, cubrir un área equivalente con una duración similar.

En el caso de Tamazula el ACV tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales durante el proceso de etanol, comparando diferentes procesos

para la producción de dicho biocombustible y gasolina convencional. Para este fin se utilizan la misma unidad funcional de consumo de energía (MJ) y emisiones de gases (g) de efecto invernadero. De esta forma se tiene una medida para comparar los resultados.

### 2.2.2 Inventario

Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional (ISO 1441 *et al.*, 2007). De una forma genérica denominaremos estos efectos ambientales como “carga ambiental”. Esta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo. En este contexto pues, la carga ambiental incluye tanto emisiones de gases contaminantes, como efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. (ISO 1441 *et al.*, 2007). En los casos en los que se trabaja con sistemas que impliquen varios productos, se procederá a asignar los flujos de materia y de energía, así como las emisiones al medio ambiente asociadas a cada producto o subproducto.

El inventario puede ser subjetivo, de acuerdo con las fuentes de información. Es por ello que se debe de validar y verificar la fuente de información y en caso que no se cuente con una veracidad en la información, es conveniente recurrir a bibliografía previa.

Para el caso que aquí se presenta, se han realizado visitas de campo al Ingenio Tamazula y se ha analizado el proceso de producción, para identificar los puntos críticos que se requieren analizar. Por otra parte, la recopilación de información proviene de los diversos departamentos de ingeniería del ingenio.

### 2.2.3 Análisis del impacto

Esta fase del ACV va dirigida a evaluar la importancia de los impactos potenciales ambientales utilizando los resultados del análisis de inventario de ciclo de vida (ISO 1441 *et al.*, 2007). En general, ese proceso implica la asociación de datos del inventario con impactos ambientales específicos tratando de valorar dichos impactos. El nivel de detalle, la elección de impactos evaluados y las metodologías usadas dependen del objetivo y alcance del estudio.

Esta evaluación puede incluir el proceso iterativo de revisión del objetivo y alcance del estudio del ACV para determinar cuándo los objetivos iniciales del estudio se han cumplido y, en el caso de no alcanzarlos, modificar el objetivo y alcance del estudio.

La fase de evaluación de impacto puede incluir, entre otros, elementos como:

- asignación de los datos del inventario a categorías de impacto (clasificación);
- modelización de los datos del inventario dentro de categorías de impacto (caracterización);
- posible agregación de los resultados en casos concretos y sólo cuando proceda (valoración).

La estructura científica y metodológica para la evaluación de impacto está aún en desarrollo. Los modelos de categorías de impacto están en diferentes etapas de desarrollo. No hay metodologías generalmente aceptadas para asociar datos del inventario con impactos potenciales específicos de un modo consistente y preciso.

En la fase de evaluación de impacto del ciclo de vida hay cierta subjetividad, como en la elección, modelización y evaluación de categorías de impacto. Por lo tanto, la transparencia es crucial para asegurar que las hipótesis están claramente descritas y presentadas.

#### **2.2.4 Interpretación del ciclo de vida**

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto, o en el caso de estudios de análisis de inventario de ciclo de vida, los resultados del análisis de inventario solamente, de acuerdo con los objetivos y alcance definidos (ISO 1441 *et al.*,2007).

Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, de forma consistente con el objetivo y alcance del estudio.

La fase de interpretación puede abarcar el proceso iterativo de examen y revisión del alcance del ACV, así como la naturaleza y calidad de los datos recogidos de acuerdo con el objetivo definido.

Las conclusiones de la fase de interpretación deberían reflejar los resultados de cualquier análisis de sensibilidad que se haya realizado. Aunque las acciones y decisiones subsecuentes pueden incorporar implicaciones ambientales identificadas en los resultados de la interpretación, se mantienen fuera del alcance del estudio de ACV, en tanto que otros factores, como la realización técnica y los aspectos económicos y sociales también se consideran.

### **2.3 Modelos para simular el ACV de biocombustibles**

Con base en la norma ISO 14040, existen diversas herramientas que evalúan el impacto ambiental, utilizando la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV). La finalidad de este proyecto es obtener indicadores que evalúan el impacto ambiental de la producción de etanol, utilizando como materia prima la caña de azúcar, pensando en que la infraestructura con la que cuenta México es adecuada, no sólo para producir azúcar y exportarla, sino también

para producir etanos y que sustituya al MTBE como oxigenante en las gasolinas.

Algunos de los programas para realizar estudios de ciclo de vida, se describen a continuación:

EBAMM (Farrell A. *et al.*,2006), este modelo está hecho para aplicarlo en E.U y treinta países más, ha sido diseñado por la Universidad de Beckley, y tiene la capacidad de realizar cálculos desde 1970 hasta 2050. Analiza las diferentes materias primas como el maíz, la madera y el switchgrass (pasto de la región norte de América).

GREET (Burnham A. *et al.*,2009), es un modelo diseñado por el Laboratorio Argonne, diseñado para uso del Departamento de Energía de Estados Unidos, siendo la primera versión de 1996. Dicha versión comenzó analizando el ciclo de vida de los combustibles, posteriormente se fue mejorando, hasta llegar a existir versiones para analizar el ciclo de vida de los vehículos. Es un modelo que tiene la ventaja de obtener indicadores a través del tiempo, sin ninguna limitación. GREET considera la situación actual de Brasil, por lo que integra a la caña de azúcar como materia prima, sin dejar de involucrar el maíz, sorgo, madera, hidrogeno y otras materias primas.

Sima Pro (Geodkoop M. *et al.*, 2010), es un modelo muy completo, en el cual se puede simular diversos biocombustibles, entre éstos el etanol derivado de la madera, caña de azúcar, biomasa y maíz. Sin embargo, la desventaja de este modelo es que no se puede modificar el código y por lo tanto las adecuaciones son limitadas.

Umberto (IFU Hamburg *et al.*,2011), es un modelo alemán con similitudes a Sima Pro, pero con la misma desventaja de ser un sistema no modificable en su código y por lo tanto si se desea adaptar a un caso en México, se tiene que hacer de acuerdo al modelo y no de acuerdo al caso.

SenterNovem (Bergsma G. *et al.*, 2006), se ha especializado en biocombustibles y cuenta con el análisis de ciclo de vida para el caso de la caña de azúcar. A diferencia de GREET, este modelo sólo calcula emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de energía, por lo que no entrega

resultados adicionales que ayuden a entender mejor el concepto de análisis de ciclo de vida.

## **2.4 Selección del modelo LCA más adecuado para México y sus requerimientos**

Como ya se ha descrito en la sección 2.3, existen diversos programas que están fundamentados en la metodología de ACV. Sin embargo, no existe actualmente un modelo diseñado y desarrollado para la situación actual de México y esto se debe a que todavía no existe un proyecto para el desarrollo del mismo. Es por ello que se ha tomado la decisión de utilizar uno de los modelos ya existentes, que sea factible adaptarlo a la situación en México y que considere a la caña de azúcar como materia prima para obtener etanol.

Así también, es suma importancia, que el modelo cuente con actualizaciones y mantenimiento constantemente, para que cuando se cuente con más información de los procesos, estas variables se puedan introducir en el modelo y los resultados puedan ser puestos al día. De esta forma se estará generando una nueva vertiente en los estudios de ciclo de vida, para los combustibles en México.

En el capítulo anterior se mencionó la viabilidad de utilizar caña de azúcar como materia prima para la producción de etanol, ya que en México se cuenta con una amplia infraestructura dentro de los ingenios azucareros.

De acuerdo con ciclo de vida del alcohol que se produce en el ingenio Tamazula al sur del estado de Jalisco, éste comienza con la preparación del suelo, siembra de la caña de azúcar, aplicación de fertilizante, quema y cosecha, transporte, generación de energía eléctrica, producción de alcohol, transporte y disposición final. El cual se observó por medio de prácticas de campo realizadas en las instalaciones de la fábrica de alcohol y azúcar del ingenio Tamazula.

El modelo que se debe a seleccionar, debe de cumplir o asemejarse al ciclo de vida que se tiene en el ingenio Tamazula y de acuerdo con los modelos que se mencionaron anteriormente, el modelo GREET, cuenta con trabajos realizados con la caña de azúcar en Brasil, así también cuenta con la ventaja que al utilizar dicho modelo, se podrán comparar los resultados que aquí se obtengan, con otras fuentes de energía, como el maíz.

## 2.5 Generalidades del modelo GREET

El modelo GREET ( Burnham A. *et al.*,2009) está diseñado por el laboratorio ARGONNE y la Universidad de Chicago, para uso del departamento de Energía de Estados Unidos, se han desarrollado dos versiones del modelo GREET: la primera versión se desarrollo para analizar el Ciclo de Vida de energéticos, dicha versión se conoce con el nombre de GREET\_1.0, y actualmente el modelo está en la versión GREET\_1.8d.1 y se han incluido fuentes de energía renovables y no renovables. La segunda vertiente se desarrolló para analizar el ciclo de vida de los vehículos automotores, la primera versión se conoce como GREET\_2.0 y la versión actual es GREET\_2.7.

GREET es uno de los modelos con mayor número de citas en la literatura, además que en cada etapa del ciclo de vida, toma en cuenta detalles que difícilmente se toman en cuenta en otros modelos, para entender más acerca del modelo GREET, se puede consultar el apéndice II.

### 2.5.1 Desarrollo del modelo

Las primeras versiones de este modelo se desarrollaron en 1990 y la primera versión de GREET (*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*), es la versión 1.0, esta versión comenzó realizando el análisis de ciclo de vida de diferentes energéticos. En este primer

modelo se incluye a la gasolina, gas natural, etanol, biodiesel, diesel y combustóleo como fuentes de energía.

En la versiones posteriores se incluyó el ciclo de vida del los vehículos de transporte, tanto público como privado.

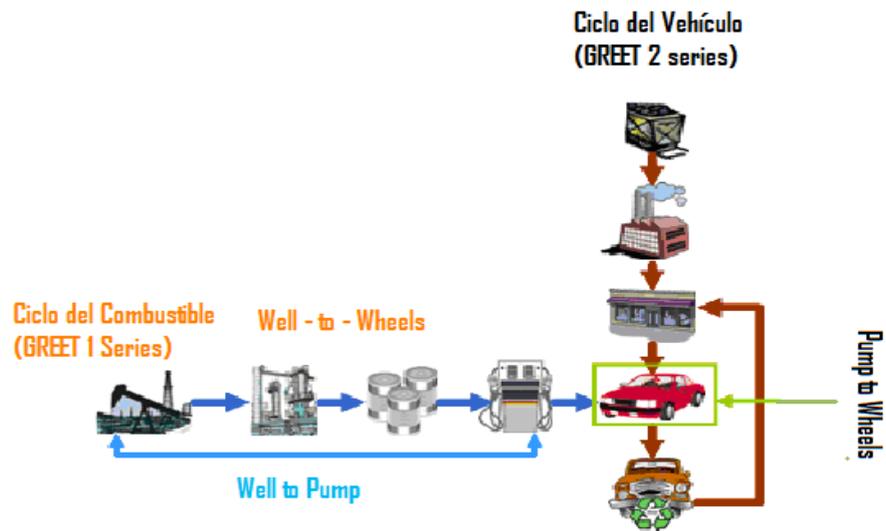


Figura 7. Modelo GREET.

### 2.5.2 GREET 1.8

La versión de GREET 1.8 se encarga de realizar el análisis de ciclo de vida, que como ya se mencionó dicho análisis está sustentado por la norma ISO 14040. Lo importante de esta versión es que GREET toma en cuenta el ciclo de vida de los energéticos, esto quiere decir que estudia desde que se produce el equipo necesario para obtener la materia prima, el proceso de fabricación, transporte de la materia prima, la transformación, el transporte hacia el lugar de uso final.

La versión GREET 1.8, es la más actual, pues data de marzo de 2009, precisamente ese ha sido el éxito del modelo, pues cuenta con más de 10 000 usuarios alrededor del mundo.

Para el caso que se ha propuesto en este proyecto, el ciclo de vida del etanol, la figura 3 explica cual es el proceso que estudia GREET 1.8 para la fabricación de etanol a partir de la caña de azúcar: el primer punto es la

fabricación de equipo agrícola para la producción de la caña de azúcar y fertilizantes, después se toma en cuenta el proceso agrícola, una vez que se ha cosechado la materia prima, se procede a transportarla de lugar en donde se cosecha hasta el ingenio azucarero en donde se podrá transformar en etanol, una vez que se obtiene el producto, será enviado al lugar en donde se puede mezclar con la gasolina sin MBTE y de ahí se vuelve a transportar a los diversos distribuidores.

### **2.5.3 GREET 2.7**

Al igual que la versión 1.8, el modelo GREET 2.7, está diseñado con base en la norma ISO 14040 y a diferencia de la versión 1.8, el ciclo de vida que analiza es el de los vehículos, esto quiere decir que como se muestra en la figura 8, aquí se estudia desde la fabricación del vehículo, hasta el reciclaje del mismo.

Para fines de este proyecto, no se utilizará esta versión del modelo GREET, ya que sólo se ha considerado el proceso de fabricación del etanol. Sin embargo, en trabajos futuros se puede realizar una combinación de ambos y obtener resultados de una cadena de suministros más amplia.

# **Capítulo 3: Metodología**

### 3.1 Selección del caso de estudio

En el capítulo uno se presentó la situación de los biocombustibles en México, y en el capítulo dos se escribió el desarrollo del concepto de análisis de ciclo de vida. En este capítulo se utiliza el modelo GREET para analizar el ciclo de vida del proceso de fabricación del alcohol. Se ha elegido a la caña de azúcar como materia prima debido a que en México la infraestructura de la industria azucarera se ha desarrollado desde el siglo XV.

En los ingenios mexicanos el tiempo de cosecha se conoce con el nombre de "zafra", este periodo comienza a finales del otoño y finaliza a principios del verano, con un tiempo de duración de 300 días en promedio [30]. La duración promedio varía de acuerdo con la capacidad de producción del ingenio y, por lo tanto, a la demanda del mercado.

Para efectos del desarrollo de este proyecto, en aras de conocer el mapa de producción actual de alcohol en los ingenios azucareros y de esa forma seleccionar el ingenio a visitar, se recurrió a la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA). Dado que la producción de alcohol no es constante y depende de la demanda y del precio de mercado, se realizaron estudios considerando dos ingenios que producen alcohol durante el mes de mayo, el ingenio Tamazula y el ingenio Pujilic. El ingenio se encuentra en el municipio de Tamazula de Gordiano en el estado de Jalisco y el ingenio Pujilic se localiza en el municipio de San Francisco Pujilic en el estado de Chiapas.

La figura 9 muestra la localización geográfica de ambos ingenios, así como los mercados potenciales para el consumo de etanol. Se observa que el ingenio Tamazula se encuentra en una ubicación geográfica estratégica para la producción y consumo de este bien debido principalmente a su cercanía a la ciudad de Guadalajara. Por otra parte el ingenio Pujilic se encuentra a más de 1,000 km al sureste de la Ciudad de México. Las grandes distancias y una falta de vías de comunicación adecuadas dificultan su transporte, con lo cual se complica la cadena de suministro.



Figura 8 : Mapa de la localización de los ingenios de caña de azúcar que producen alcohol y mercados potenciales. Fuente: [www.google.com.mx](http://www.google.com.mx), consultado Diciembre de 2010.

Datos proporcionados por la Unión Nacional de Cañeros A.C (UNC) (UNC *et al.*, 2006) muestran que el ingenio Tamazula tuvo un producción de 2, 916,370 litros de alcohol en la zafra 2008/2009, en tanto que el ingenio Pujiltilic produjo 9, 491,980 litros de alcohol. Se ha seleccionado al ingenio Tamazula como caso de estudio debido a que de acuerdo con historial de producción de alcohol representa un caso típico de los ingenios mexicanos y como se ha mencionado, cuenta con una cercanía a un mercado potencial de uso de etanol.



Figura 9: Vista del Ingenio Tamazula

### 3.2 Fronteras del sistema

Para realizar un adecuado análisis de ciclo de vida es necesario delimitar el caso de estudio así como establecer los indicadores deseados. Para el caso del ingenio Tamazula, es importante señalar que la disposición final del alcohol que se produce está destinada al consumo humano e industria farmacéutica. Ya que las gasolinas mexicanas no utilizan el etanol como oxigenante.

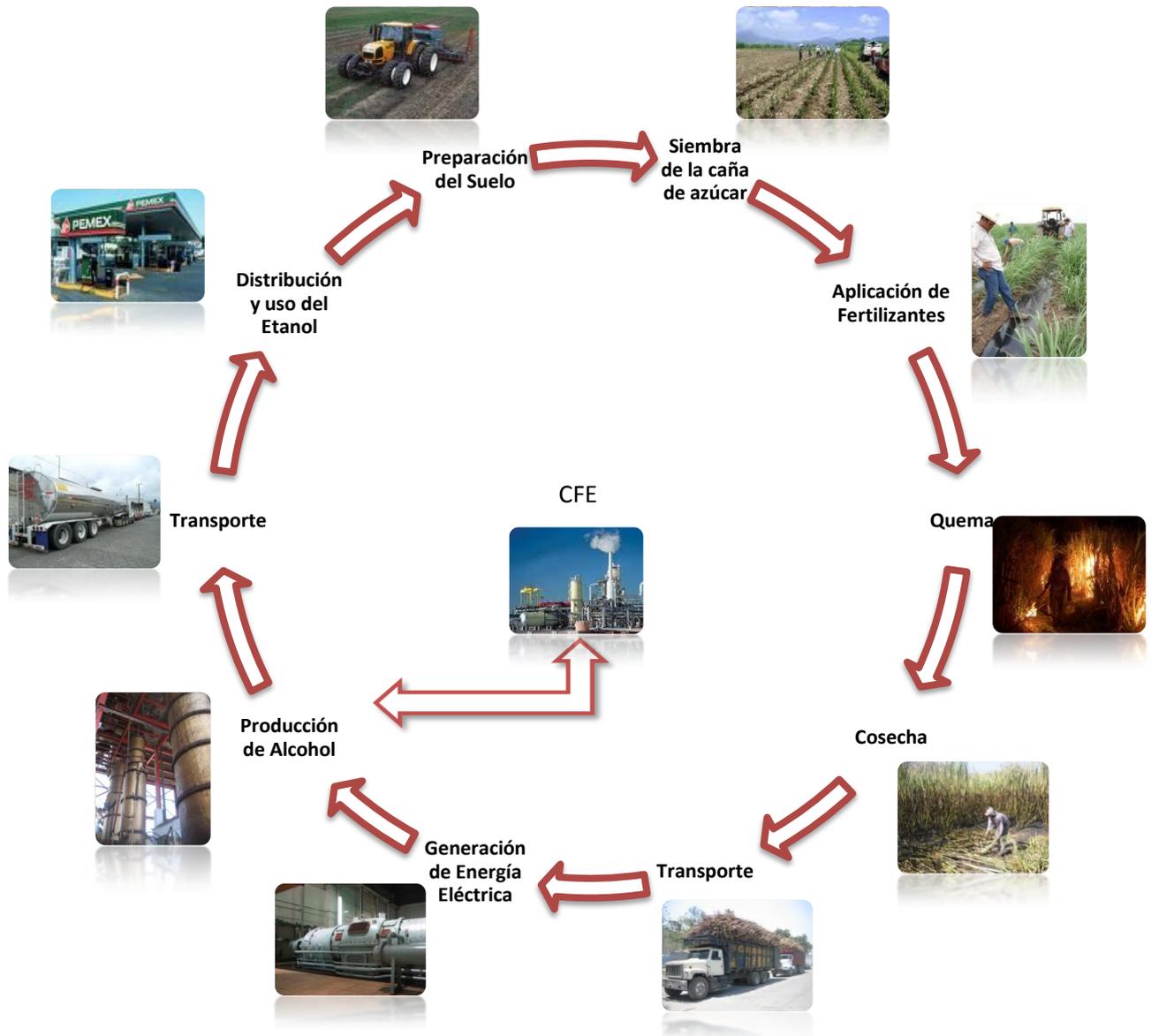


Figura 10. Ciclo de vida del etanol.

Por lo anterior, se ha delimitado el análisis a establecer las fronteras desde que se siembra la materia prima hasta que el alcohol es distribuido. La cadena de suministro considerada aquí abarca un radio de no mayor de 30 Km. Para este estudio no se ha considerado el cambio de uso de suelo adicional. Eso se debe a que la producción de alcohol del Ingenio Tamazula es relativamente baja, y por lo tanto no se considera que actualmente ésta demande más zonas de cultivo.

Los indicadores que se toman en cuenta son: energía total, energía renovable y no renovable, emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ), compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, óxidos nitrosos,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y óxidos de azufre.

### 3.3 Generación de datos de entrada para el modelo GREET

Una de las problemáticas que se tuvieron durante el desarrollo de este proyecto es la generación de datos de entrada: existe falta de documentación y estudios relacionados con la producción de alcohol carburante. Es por ello que se realizaron visitas al Ingenio Tamazula, en fábrica y en campo para obtener información de cada una de las etapas de la cadena de suministro.

La información que se presenta a continuación fue proporcionada por los diversos departamentos de ingeniería del Ingenio Tamazula. La información adicional que requiere GREET y que no se pudo recabar durante la visita al ingenio, se obtuvo a partir de estudios realizados por Michael Wang (Wang M. *et al.*, 2007) e Isaias Macedo (Macedo I. *et al.*, 2007).

Asimismo, es importante señalar que la información que a continuación se presenta es referente a la fabricación de alcohol para consumo humano y uso en la industria farmacéutica. Al momento aun no se produce alcohol carburante (etanol) en el Ingenio Tamazula. Se considera que este paso adicional al proceso no requiere una alta tecnología y/o consumo de energía significativos. Por lo tanto los resultados que posteriormente se presentan son muy cercanos a la realidad.

### 3.3.1 Fertilizantes

Para obtener una eficiencia en la producción de 90 t de caña por hectárea, durante el proceso de siembra de la caña de azúcar se aplica nitrógeno (N), óxido de fósforo ( $P_2O_5$ ), potasio ( $K_2O$ ) y carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), de acuerdo a la tabla 1. La aplicación se efectúa una vez que se ha cultivado o cortado la caña de azúcar.

En los casos de N,  $P_2O_5$  y  $K_2O$ , la información fue proporcionada por el área de ingeniería agrónoma del Ingenio Tamazula. Para el caso del  $CaCO_3$  no fue posible cuantificar una cantidad exacta, ya que este insumo depende del tipo de caña que se cultive y éste a la vez depende de cada uno de los agricultores, por ello se decidió a tomar el valor que proporciona Macedo, para el caso de caña de azúcar en Brasil.

Fertilizantes	Kg/t caña	Fuente
N	1.926	Tamazula
K	0.63	Tamazula
Ca	1.284	Tamazula
$CaCO_3$	5.337	Macedo <sup>3</sup>

Tabla 2: Proporción de fertilizantes

La información que se proporciona en la Tabla 2 se ha convertido a gramos por tonelada de caña para fines de simulación en GREET.

### 3.3.2 Herbicidas e insecticidas

Los herbicidas se aplican para combatir la maleza durante el crecimiento de la caña de azúcar. Los insecticidas se aplican una vez que está creciendo la

planta para combatir plagas que dañen los cultivos. El departamento de ingeniería agrónoma del ingenio Tamazula cuenta con insecticidas naturales para reducir el uso de insecticidas químicos. En la Tabla 3 se enlistan la cantidad de herbicidas e insecticidas empleados en el proceso de producción en Tamazula.

<b>Herbicidas</b>	<b>0.027 Kg / t caña</b>	<b>Tamazula</b>
<b>Insecticidas</b>	<b>0.183 Kg / t caña</b>	<b>Tamazula</b>

*Tabla 3: Herbicidas e insecticidas.*

### 3.3.3 Cosecha de la caña y quema a cielo abierto

La cosecha de caña de azúcar en el Ingenio Tamazula se realiza manualmente y con maquinaria especializada (Tabla 4). Sin embargo, alrededor de un 85% del corte se realiza manualmente (figura 11 y 12). En este caso se queman las hojas antes y después del corte. De acuerdo a Macedo, la producción de hojas por tonelada de caña de azúcar es de 280 kg por tonelada de caña de azúcar y con una humedad del 50 %. Al practicar este proceso existen emisiones de metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), material particulado menor a 10 y 2.5 micras, compuestos orgánicos volátiles (VOC) y óxidos de sulfuro (SO<sub>x</sub>). Estas emisiones han sido simuladas por medio de GREET y se han tomado los factores de emisiones de gases contaminantes producidos por la quema de caña de azúcar reportados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés; ver anexo III).

<b>Quema a cielo abierto</b>	<b>85 %</b>
<b>Corte con maquinaria</b>	<b>15 %</b>

*Tabla 4: Porcentaje de quema de caña a cielo abierto.*



*Figura 11: Quema a cielo abierto y cosecha de caña de azúcar manualmente. Fuente Tamazula.*



*Figura 12: Cosecha de caña de azúcar manualmente. Fuente Tamazula*

Por otra parte al utilizar maquinaria especializada (figura 13), ésta va suministrando la caña de azúcar a los camiones y facilita el manejo de la misma, además de que la cadena productiva es más eficiente y la programación de cortes elimina cortes en el flujo de la producción, disminuyendo emisiones de gases contaminantes.



*Figura 13: Corte de caña de azúcar con maquinaria. Fuente Tamazula*

### 3.3.4 Transporte de los campos de cultivo al ingenio Tamazula

La caña de azúcar cosechada contiene aproximadamente un 70% de agua. Debido a que la caña de azúcar es voluminosa y pesada, los ingenios de caña de azúcar se construyen en medio de los campos de explotación, con finalidad de facilitar la logística y reducir al mínimo la distancia de transporte.

La caña de azúcar se transporta a través de camiones (figura 14), en un promedio de 30 Km, de los campos de producción al Ingenio Tamazula. En promedio cada camión transporta 24 toneladas de caña de azúcar



Figura 14: Transporte de los campos al Ingenio Tamazula. Fuente Tamazula.

El motor con el que cuentan estas unidades es variado, por lo que se encuestó a los transportistas y se consideró que el consumo del motor más representativo se presenta en la tabla 5. Esta información se incluye en el modelo GREET, por lo que no ha sido necesario hacer modificaciones al mismo.

<b>Capacidad de Carga</b>	<b>24 t</b>
<b>Distancia promedio</b>	<b>30 km</b>

**Eficiencia del motor**

**5.5 km/ l**

Tabla 5: Características de los motores y capacidad de carga del transporte.

### 3.3.5 Producción de alcohol en la fábrica

Una vez que la caña de azúcar ha llegado al Ingenio Tamazula, ésta se somete a un lavado y trituración para extraer los jugos y formar mieles que posteriormente se pueden transformar en azúcar y alcohol. Para el caso de Brasil, la producción de alcohol carburante (etanol) y azúcar, depende de la demanda del mercado. Así los procesos de producción son flexibles y existe una logística interna en los ingenios azucareros, siempre en función de la demanda.

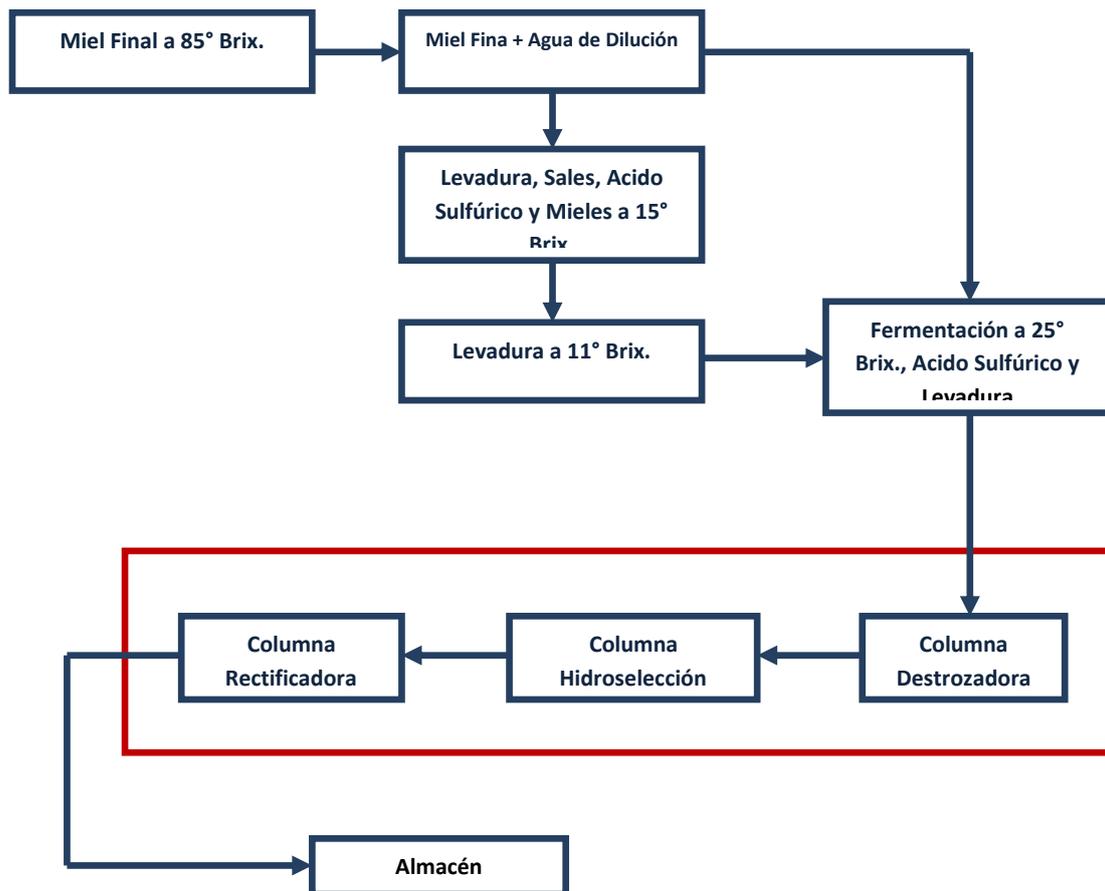


Figura 15: Ruta de proceso de etanol una vez que se obtienen las mieles.

En el caso del Ingenio Tamazula, el principal producto es el azúcar, por lo que la producción del alcohol depende de las mieles de baja calidad que se obtienen después en la planta de azúcar, siendo estas del orden de 15%, por lo que estas mieles, son enviadas a la planta de alcohol en donde son procesadas para fabricar alcohol. La planta de alcohol produce alrededor de 2,500,000 litros de alcohol por periodo de producción. El periodo de la zafra es de alrededor de 300 días y la planta de alcohol opera sólo 76 días del total de la zafra.

A continuación el jugo es fermentado dentro de la planta de alcohol y destilado para la producción de alcohol. Durante la fermentación se emite la mayor cantidad de CO<sub>2</sub> durante el proceso en fábrica. Para propósitos de este proyecto se consideró que el 100% del jugo que proviene de la caña de azúcar es utilizado para la producción de alcohol. En la figura 15, se ilustra de una forma simplificada la producción del alcohol y azúcar que se producen en el Ingenio Tamazula. Para ver más detalles de los procesos ver Anexo I.

En la tabla 6 se muestran la cantidad de alcohol que se obtiene por tonelada de caña de azúcar en el ingenio Tamazula, este valor ha sido calculado con ayuda de los ingenieros de producción encargados del área de alcohol y azúcar, ya que este dato no lo contabilizan en las estadísticas. Así también se ha incluido la comparación de este valor con diversos estudios.

Producción de alcohol/t de caña de azúcar	Fuente
80	Tamazula
90	Macedo

Tabla 6: Producción de alcohol por tonelada de caña de azúcar.

### 3.3.6 Energía requerida en la planta

La operación de la planta de alcohol requiere energía mecánica, química, eléctrica y térmica, siendo las dos últimas las de mayor demanda

dentro de la producción de alcohol. Una de las ventajas con que cuentan los ingenios de caña de azúcar es la producción de bagazo, el cual es utilizado como combustible para producir calor y cubrir la demanda interna de energía térmica y por lo tanto la demanda de energía eléctrica. Por esta razón los ingenios de caña de azúcar tienen el potencial de contar con una autonomía energética.

Sin embargo, al momento de visitar, el ingenio Tamazula, no contaba con dicha autonomía energética, ya que la energía eléctrica que se utiliza en la operación de la planta de alcohol se compra a la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En la tabla 5 se muestra la demanda de energía que requiere la operación de la planta de alcohol. Algunos de los datos se tomaron de la literatura abierta, ya que en el ingenio Tamazula, no se contaba con dicha información.

<b>Parámetros</b>	<b>MJ/Mt caña de azúcar</b>	<b>Fuente</b>
<b>Energía Eléctrica</b>	<b>43</b>	<b>Tamazula</b>
<b>Energía Mecánica</b>	<b>57.6</b>	<b>Macedo</b>
<b>Energía Térmica</b>	<b>1100</b>	<b>Tamazula</b>
<b>Lubricantes</b>	<b>6.36</b>	<b>Macedo</b>
<b>Energía requerida en la de la fabrica</b>	<b>9.29</b>	<b>Macedo</b>
<b>Energía requerida en la fabricación de los equipos</b>	<b>24.16</b>	<b>Macedo</b>

*Tabla 7: Consumo de energía en la fábrica.*

Se consideró que la energía térmica que se requiere para la operación es de 116 t de vapor /día (Tamazula), ésta es suministrada por la combustión del bagazo en la caldera con una eficiencia de 1 t de vapor / 1 t de bagazo.

### 3.3.7 Bagazo

El bagazo es el residuo de la caña de azúcar después de extraer el jugo. Por su alto contenido de carbono (46.3 % en peso) sirve como una excelente fuente de energía para los procesos de combustión dentro del Ingenio Tamazula. Por lo tanto, el bagazo es quemado en una caldera para producir vapor y entra en las turbinas que mueven los generadores que producen energía eléctrica utilizada, en el Ingenio.

Para el caso del ingenio Tamazula, se obtienen 319 kg de bagazo por tonelada de caña de azúcar, con una humedad de 51.6%. Se ha considerado el poder calorífico del bagazo, donde existe un rango entre 7.530 y 7.736 MJ/kg (Macedo I. *et al.*, 2007), con una humedad de 50%. Aquí se ha considerado un poder calorífico del bagazo de 7.530 MJ/kg.

Por otra parte al quemar el bagazo para obtener energía calorífica, éste genera emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, por la quema de la biomasa. En el anexo III se especifican los factores de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de acuerdo a la guía del IPCC de 2006.



Figura 16: Bagazo que se obtiene de la caña de azúcar.

### 3.3.8 Transporte del ingenio al centro de mezclado

El etanol producido es transportado al centro de mezclado en donde se agregará a la gasolina en un rango de 5% a 15%, como sustituto del MTBE. Para el caso de estudio del Ingenio Tamazula, el alcohol que se produce se utiliza en la región para consumo humano o farmacéutico. Por lo tanto se ha considerado un centro de mezclado hipotético en un radio de 50 Km, con el objeto de incluir este aspecto del transporte del ingenio.

Ya que el modelo GREET cuenta con diferentes variantes de transporte, como el terrestre, marítimo, ductos y tren, para este estudio se consideró que el transporte se realizaba de forma terrestre en camiones-pipa, con las mismas características del transporte del los campos de cultivo al ingenio (ver tabla 4).

### 3.3.9 Generación e importación de energía eléctrica

Como se ha mencionado en el punto 3.3.7, el bagazo que se obtiene de la extracción de los jugos de la caña de azúcar es utilizado en la producción de energía eléctrica. En el caso del Ingenio Tamazula, la energía eléctrica que se produce cumple con la demanda interna de la fábrica de azúcar, pero la que se requiere en la operación de la planta de alcohol se importa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Como se mencionó, en consecuencia, el Ingenio Tamazula no cuenta con una autonomía energética.



Figura 6: Generador de energía eléctrica

La planta de alcohol requiere de 0.757 kWh, para producir un litro de alcohol, el cual proviene en un porcentaje de las plantas generadoras de energía eléctrica de CFE. El modelo GREET toma en cuenta la infraestructura con la que cuenta el país para determinar el consumo de energía y emisiones. En la tabla 8, se especifica la infraestructura instalada en el país.

<b>Tipo de generación</b>	<b>Capacidad efectiva (MW)</b>	<b>%</b>
<b>Termoeléctrica</b>	<b>23,474.67</b>	<b>46</b>
<b>Hidroeléctrica</b>	<b>11,174.90</b>	<b>22</b>
<b>Carboeléctrica</b>	<b>2,6000.00</b>	<b>5</b>
<b>Geotermoeléctrica</b>	<b>964.5</b>	<b>2</b>
<b>Eoloeléctrica</b>	<b>85.25</b>	<b>0</b>
<b>Nucleoeléctrica</b>	<b>1,364.88</b>	<b>3</b>
<b>Termoeléctrica (P.I)</b>	<b>11,906.90</b>	<b>23</b>
<b>Total</b>	<b>51,571.10</b>	<b>100</b>

Tabla 8: Infraestructura instalada para generar energía eléctrica en México. Fuente: [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx).

### 3.3.10 Transporte del etanol del Ingenio Tamazula al centro de mezclado

El capítulo 1 se detalló el ciclo de vida para el etanol, desde que se siembra la materia prima, hasta que se encuentra en una estación de servicio disponible para el usuario final. Sin embargo, en el caso del ingenio Tamazula en donde no existe una producción de etanol (99.9% de pureza) y sólo se cuenta con una producción de alcohol para uso farmacéutico y humano (96 % de pureza), el alcohol producido se vende a pequeños y medianos distribuidores, los cuales llegan con su propio transporte al almacén del

ingenio, realizan una compra de acuerdo a sus necesidades y se desplazan de 10 km a 150 km en promedio. Determinar un transporte promedio y una distancia específica resulta muy complicado.

Considerando que el etanol que se producirá en el Ingenio Tamazula se enviará a mezclar con gasolina sin aditivos en una proporción del 5% en volumen, se ha considerado que el transporte del Ingenio al centro de mezclado será realizado por medio de camiones-pipa que actualmente distribuyen la gasolina convencional a las estaciones de servicio.

Se estableció que el centro de mezclado se encuentre en un radio no mayor de 50 km y que el motor de combustión de los camiones-pipa sea de las mismas características a las de los camiones que transportan la materia prima al ingenio (ver 3.3.4).

### 3.4 Escenarios comparativos

Se han seleccionado cinco escenarios para comparar nuestros resultados. Tres de los escenarios que se presentarán son estudios previamente realizados con el modelo GREET 1.8 (Wang) y los dos escenarios restantes se refieren al Ingenio Tamazula. A continuación se describen cada uno de ellos:

**Caso 1:** Producción de etanol en Estados Unidos, utilizando maíz como materia prima y distribuido en el mercado local. Denominado E.U.

**Caso 2:** Producción de etanol en Brasil, utilizando caña de azúcar como materia prima y distribuido en el mercado local. Denominado Brasil.

**Caso 3:** Producción de gasolina convencional, en una refinería de Estados Unidos y distribuido en el mercado local. Se ha tomado a este caso como ejemplo comparativo ya que el 60% de la gasolina que se utiliza en México proviene de refinerías en Estados Unidos. Denominado gasolina\_c.

**Caso 4:** Producción actual de alcohol en el Ingenio Tamazula, utilizando caña de azúcar como materia prima y distribuido en el mercado local. Denominado Tamazula\_A.

**Caso 5:** Producción de alcohol en el Ingenio Tamazula, utilizando caña de azúcar como materia prima y distribuido en el mercado local. En este caso se ha considerado que el ingenio cuenta con autonomía energética y no es necesario comprar electricidad a la CFE, además de que se incrementó la eficiencia de producción en el alcohol y paso de 80 l/t de caña de azúcar a 90 l/t de caña de azúcar, acercando dicha eficiencia a la que se tiene en Brasil. Denominado caso Tamazula\_B.

# Capítulo 4: Resultados

## 4.1 Generalidades

Como se indicó en el capítulo anterior, se establecieron cuatro diferentes escenarios para la producción de etanol, en los que se involucran casos en Brasil, Estados Unidos y México. Además, se considera el caso de la gasolina convencional con fines de comparación entre los combustibles convencionales que se usan actualmente y los biocombustibles. A continuación se presenta a) el balance de energía del well-to-pump, así como b) las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) correspondiente a cada proceso de fabricación.

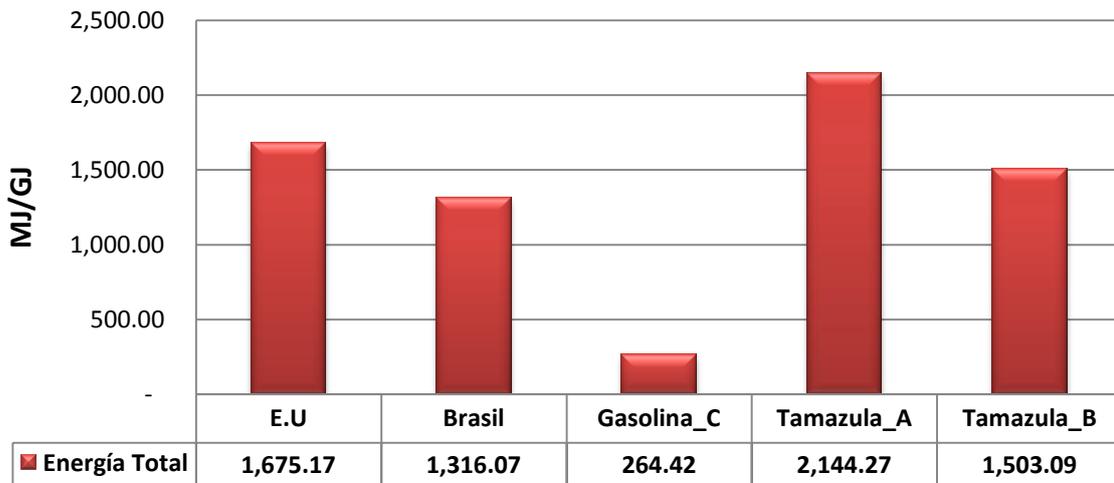
## 4.2 Balance de energía

Se han obtenido dos resultados para el caso de estudio, el primero ha sido denominado como Tamazula A, el cual muestra la situación actual en la que está operando el ingenio Tamazula, donde la producción de etanol es relativamente baja y la energía eléctrica se compra a la Compañía Federal de Electricidad (CFE). El segundo, Tamazula B, se incluye un nivel de producción de etanol similar a Brasil, además de contar con autonomía y una exportación de energía eléctrica.

En la figura 17 se ilustra la cantidad de energía que se necesita consumir para producir un GJ de etanol y/o gasolina convencional en el proceso well-to-pump. Se observa que para el caso de etanol, el consumo de energía es mayor en el caso de Tamazula\_A, al compararlo con los casos de E.U y Brasil, siendo los tres casos mayores al compararlos con la producción de gasolina convencional.

Al mejorar las condiciones actuales y presentar el caso de Tamazula\_B, se observa que existe una disminución de consumo de energía en el proceso, por lo que se aproxima a la situación actual de Brasil.

## Balance de energía



*Figura 17. Energía consumida durante el well-to-pump.*

En la figura 18, se muestra el consumo de energía renovable y no renovable para generar un GJ de etanol y/o gasolina convencional en el proceso well-to-pump. Para el caso del etanol en donde se utiliza a la caña de azúcar como materia prima, se observa que la mayor parte de energía que se utiliza durante el ciclo de vida proviene de energías renovables (ver figura 17). Por el contrario, para el caso de la gasolina convencional, la energía que se necesita para el ciclo de vida proviene en un 90% de energías no renovables. En el caso de Tamazula A, el 68% de la energía que se utiliza proviene del bagazo de caña, que es el principal residuo que se obtiene de la caña de azúcar. Este residuo se utiliza para generar energía eléctrica a través del ciclo combinado. Cabe señalar que el 32% de energía restante proviene de CFE debido a que la capacidad instalada para generar energía eléctrica no cubre el 100% de la operación en Tamazula A aunque cuenta con la materia prima (bagazo) para producir la energía eléctrica que se necesita en la operación del ingenio y la planta de etanol.

Además, se detectó que una fuente de ineficiencia energética se encuentra en los generadores de energía eléctrica. Son generadores con más de 60 años de vida y, por tanto, la eficiencia del sistema es menor comparada con un generador moderno. Una segunda razón por la cual en el caso de Tamazula A necesita mayor energía para generar un GJ de etanol es el

rendimiento en litros que se tiene por tonelada de caña de azúcar (figura 17): mientras que en el caso de Brasil la eficiencia es de 91 litros por tonelada de caña de azúcar, en Tamazula A es de sólo 75 litros. Por otra parte, y aunado a las consideraciones antes descritas, la capacidad del transporte que se utiliza para llevar la materia prima de los campos de cultivo al molino en Brasil y en Tamazula es de 60 y 35 toneladas. Finalmente, cuando se dispone del producto final, éste es enviado en camiones-pipa al lugar en donde se utiliza. Por esta razón se utiliza motores de combustión en el transporte con mayor uso de energía no renovable.

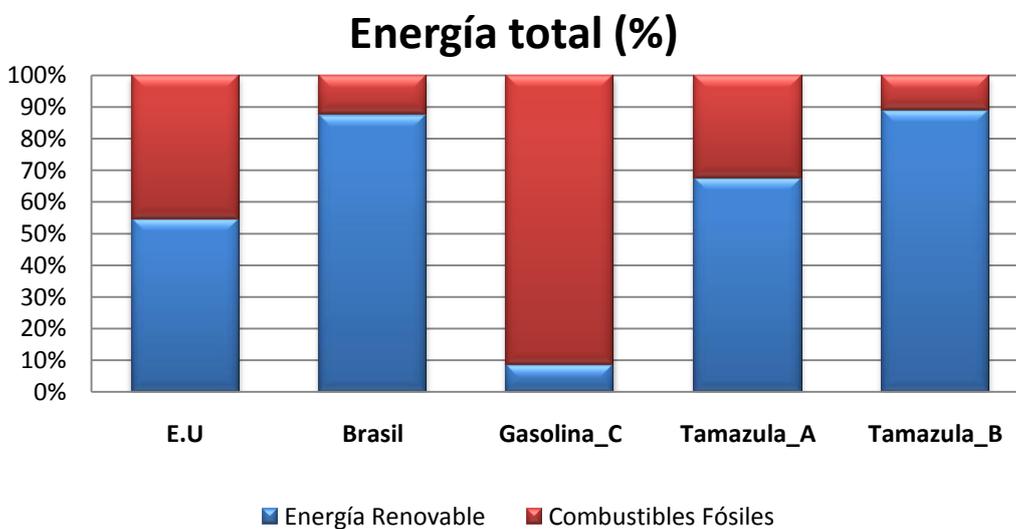


Figura 18: Consumo de energía renovable y no renovable.

En el caso de Tamazula B, se ha incrementado la producción de etanol por tonelada de caña de azúcar de 80 litros a 90 litros. Además genera la energía eléctrica para operar la planta de etanol mediante energía que proviene del bagazo. Así la energía renovable se aprovecha en un 90%, lo cual refleja un decremento en el uso de energía no renovable. Al dejar de comprar energía eléctrica a la CFE, no se quema combustóleo. Con este nuevo escenario, en términos de consumo de energía no renovable, Tamazula B se coloca en un nivel de aprovechamiento entre Estados Unidos y Brasil.

Finalmente en la figura 19, se muestran las fuentes de energía no renovable consumidas por proceso. Es evidente que para el caso de Tamazula A la mayor fuente de energía son derivados del petróleo (Combustóleo, Diesel,

Gasolina, etc.). Al realizar modificaciones anteriormente descritas, el escenario para Tamazula B resulta ser comparable a la situación actual de Brasil.

### Energía no-renovable (%)

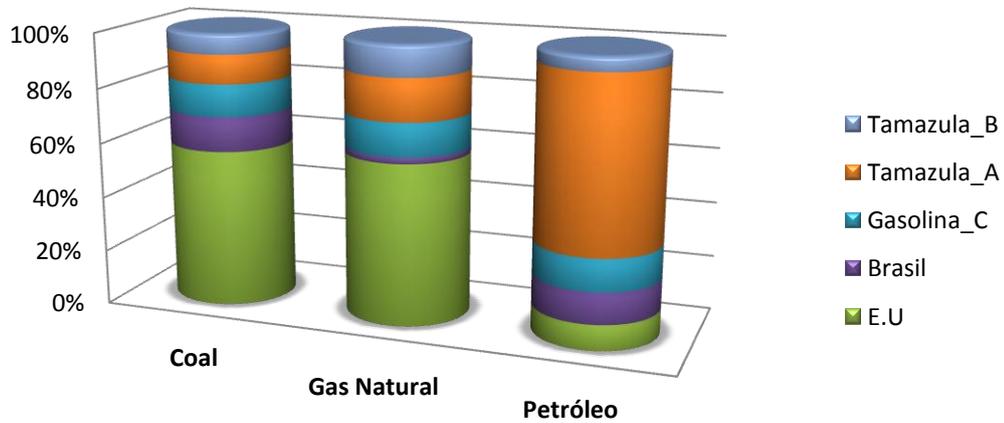


Figura 19: Porcentaje de energía no renovable que se consume en cada proceso.

En la figura 20, se presenta el consumo de energía por etapas del ACV. Se observa que la energía eléctrica procedente de CFE, tiene una participación significativa, por lo que aumentan el consumo de energía en el CV y hace que el proceso sea menos eficiente.

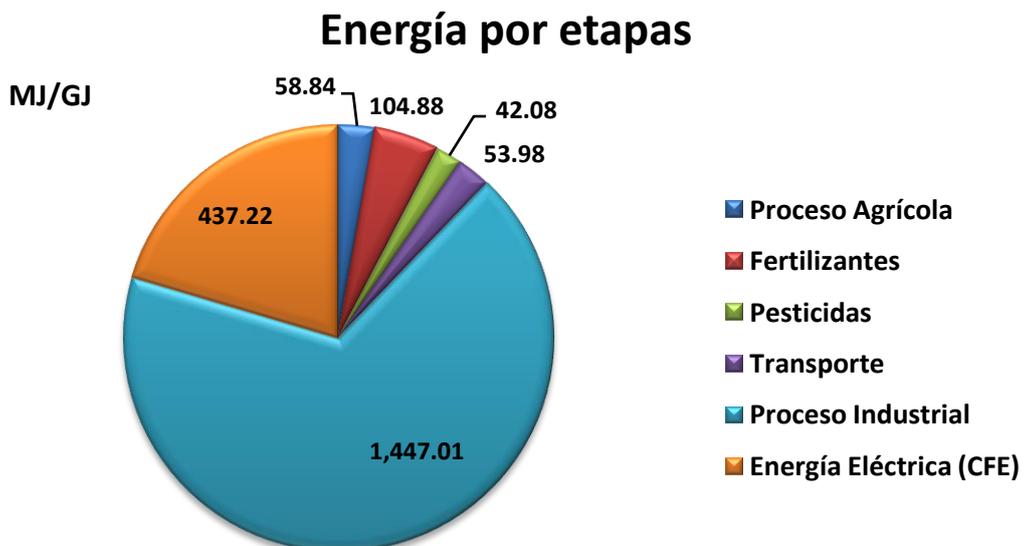


Figura 20: Energía que se consume por etapas.

## 4.3 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Debido a su importancia en impacto ambiental, se han estudiado los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) incluyendo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

### 4.3.1 Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  en el ciclo de vida del etanol, para el caso de la caña de azúcar en Tamazula A y Tamazula B, provienen de la quema a cielo abierto que se hace durante la cosecha, del transporte de los campos a la fábrica, del proceso de fermentación dentro de la fábrica, del transporte de la fábrica al cliente final y de las plantas generadoras de energía eléctrica de CFE que le vende a Tamazula A.

La gráfica 5 muestra los resultados obtenidos en la comparación de los casos escogidos. En los procesos de fabricación de etanol mediante maíz y caña de azúcar, o sea E.U, Brasil, Tamazula A y Tamazula B, la disminución de  $\text{CO}_2$  es muy importante comparada con el caso de la gasolina. En el caso de Tamazula A, la disminución es de  $-20,077 \text{ g/GJ}$ . En este sentido, las condiciones de operación de Tamazula A resultan ser muy similares a la situación actual de las fábricas en los Estados Unidos ( $-19,331 \text{ g/GJ}$ ), que utilizan al maíz como su principal materia prima para fabricar etanol. Por otra parte, el caso de Brasil resulta ser el proceso más eficiente, ya que logra una disminución de  $\text{CO}_2$ : los niveles obtenidos se encuentran en un  $-400\%$  por debajo de la gasolina convencional y en un  $-200\%$  por debajo de los procesos de maíz en Estados Unidos. Resulta evidente que, para el caso de Tamazula B, se obtendría una situación similar al de Brasil con respecto a las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

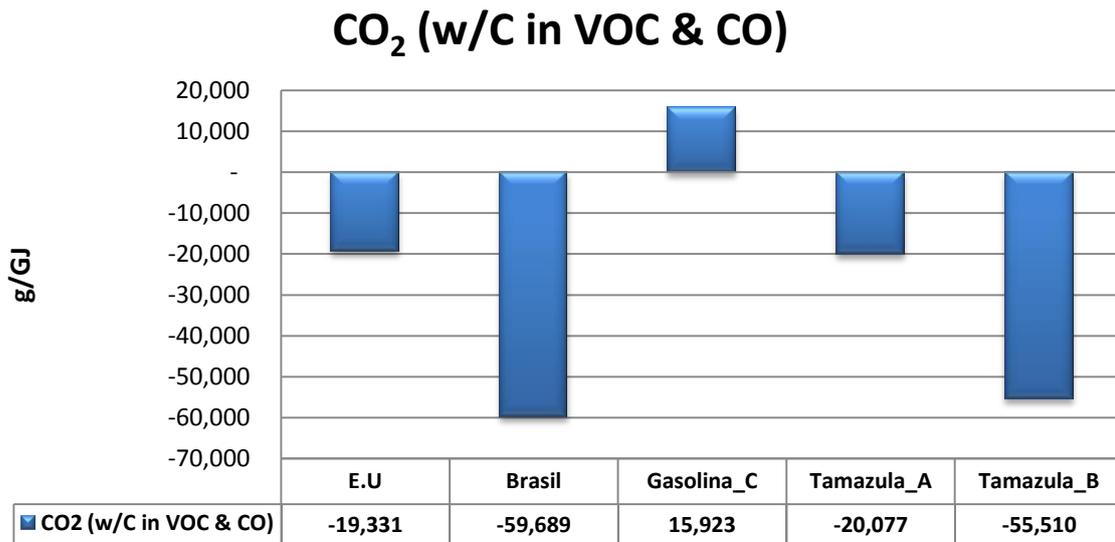


Figura 21: Emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

#### 4.3.2 Metano (CH<sub>4</sub>)

En el ciclo de vida del etanol, el metano (CH<sub>4</sub>) tiene su origen primordial en la quema a cielo abierto de la caña de azúcar durante el proceso de la cosecha. La figura 22 muestra los mayores niveles de emisiones se producen en los casos de Brasil, Tamazula A y Tamazula B. Los niveles encontrados sobrepasan los niveles que se producen durante el Ciclo de Vida de la gasolina convencional, o bien con el Ciclo de Vida del etanol proveniente del maíz, caso E.U. Cabe hacer notar, sin embargo, que para el caso de Tamazula A, las emisiones de CH<sub>4</sub> son mayores en un 30% comparada con Brasil. En el caso de Tamazula B, las emisiones de CH<sub>4</sub> se comportan de una forma muy similar al caso de Brasil. Por lo tanto en el caso de Tamazula B, las emisiones de CH<sub>4</sub> disminuyen con respecto a la situación actual del caso Tamazula A. Esto se debe a existe un mejor aprovechamiento de la energía al contar con una autonomía energética y a la vez existe una mayor eficiencia en la producción de etanol por tonelada de caña de azúcar.

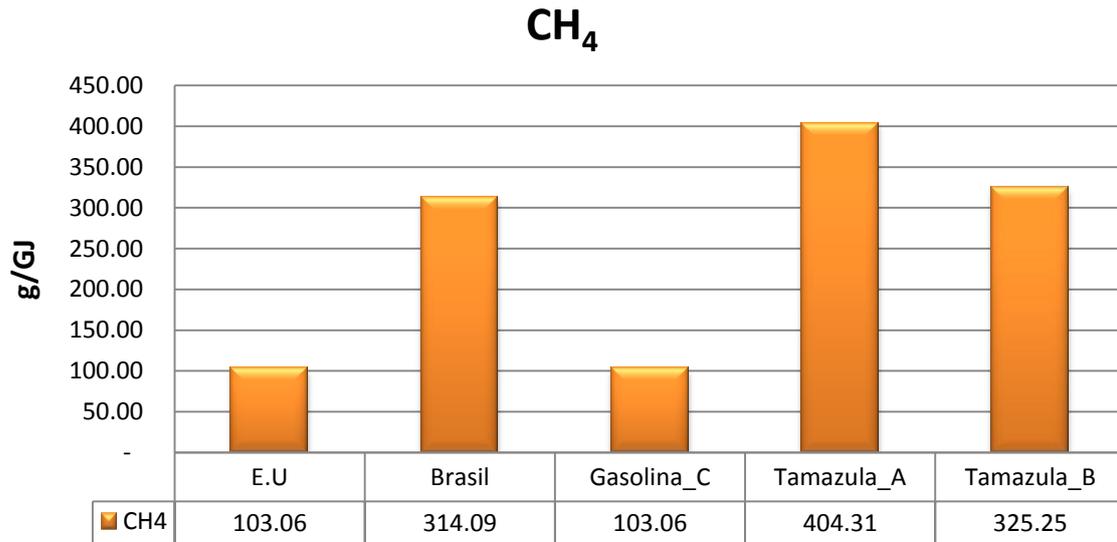


Figura 22. Emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>)

#### 4.3.3 Oxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O)

Las emisiones de oxido de nitrógeno durante el ciclo de vida del etanol se generan principalmente en el proceso agrícola y debido a la aplicación de fertilizantes. En México y Brasil, el fertilizante más utilizado es la urea. Este fertilizante se vierte directamente en el suelo y se volatiza convirtiéndose en N<sub>2</sub>O. De igual forma, en Estados Unidos se utiliza el nitrógeno como fertilizante en la obtención de etanol a partir de maíz como materia prima.

La figura 23 muestra emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en función de los gramos que se emiten a la atmósfera por 1GJ de energía producido, esto en unidades de CO<sub>2</sub>. Se observa que los procesos de etanol emiten más óxido nitroso con respecto a la gasolina convencional. Por lo tanto, son más contaminantes en este rubro.

Los resultados obtenidos muestran que para el caso de Tamazula A, las emisiones de N<sub>2</sub>O son comparables a las del caso de Estados Unidos, siendo mayores en un 50% al caso de Brasil. Estos resultados pueden atribuirse a que en Brasil se están aplicando 75 Kg de nitrógeno por hectárea, por lo contrario, en México se aplican alrededor de 100 Kg por hectárea. En el caso de

Tamazula B, las emisiones son equiparables a los obtenidos para el caso de Tamazula A y bien pueden atribuirse a la similitud en el tipo de suelo. La cantidad que se aplica de un fertilizante dependerá del rendimiento esperado de la caña de azúcar que, a su vez, será función del tipo de suelo.

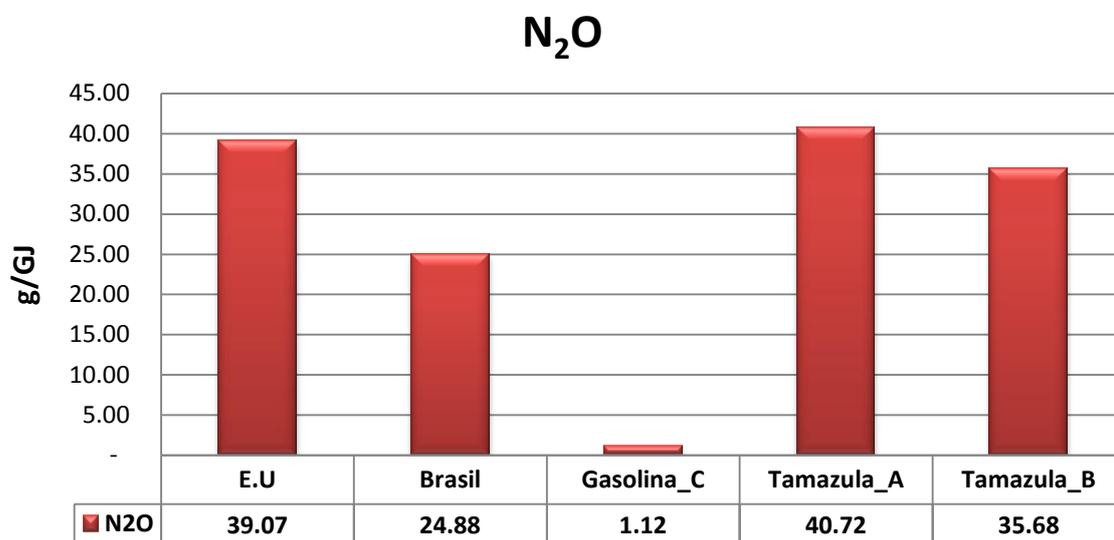


Figura 23. Emisiones de oxido de nitroso (N<sub>2</sub>O).

#### 4.4 Balance de emisiones de GEI

La figura 24 muestra el balance de emisiones equivalentes de GEI en el Ciclo de Vida del Etanol para los casos considerados. Brasil muestra una importante disminución en emisiones. Dicha reducción es del orden de 2.3 comparada con la gasolina convencional y 8.6 veces más si se compara con el caso de E.U.

Para el caso de Tamazula A, se observa un valor positivo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esto es, al final del ciclo de vida se emiten 2,163.97 gramos por cada GJ disponibles para ser utilizados por el usuario final. Se observa que en el caso de Brasil existe una disminución en 20.3 veces de emisiones de GEI con respecto a Tamazula A. Si se compara con el caso de la gasolina convencional, se observa que en el caso de Tamazula A disminuyen las emisiones en 8.6 veces menos que la gasolina

convencional. En este sentido puede concluirse que existe una disminución significativa en las emisiones equivalentes de GEI para el caso de Tamazula A, aunque su balance de emisiones sea positivo.

Los resultados generados para el caso de Tamazula B son semejantes a aquellos obtenidos para el caso de Brasil. Estos resultados pueden explicarse debido a un mejor aprovechamiento de la energía renovable (ver figura 18), al dejar de comprar energía eléctrica a CFE y mejorar la eficiencia de producción de etanol por tonelada de caña de azúcar, y hacerse un mejor uso de energía renovable que ahora se está desaprovechando.

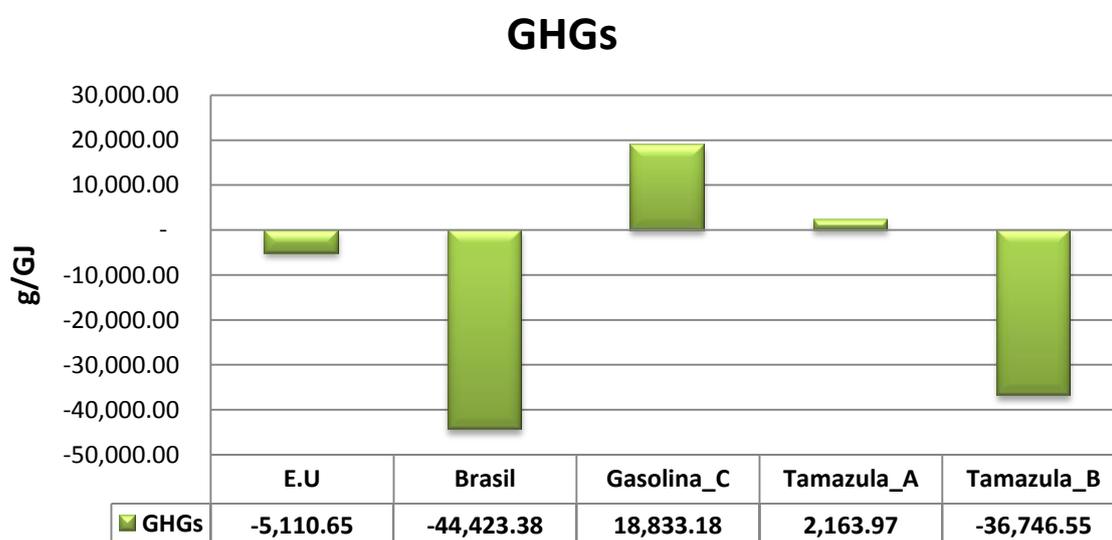


Figura 24. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

#### 4.5 Compuestos orgánicos volátiles (VOC)

En la figura 25, se muestra que en los casos en donde se lleva a cabo el proceso de fabricación de etanol, utilizando a la caña de azúcar como materia prima, el incremento en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) es significativo comparado con el caso de la Gasolina C y el caso del etanol producido a través del maíz. Si bien las plantas de maíz emiten VOC durante su crecimiento, las de caña de azúcar, emiten VOC durante su crecimiento, durante el proceso de cosecha (ya que el 80% de los cultivos son

quemados a cielo abierto), cuando se extrae el jugo en la fábrica, y cuando el bagazo, es utilizado para generar energía eléctrica.

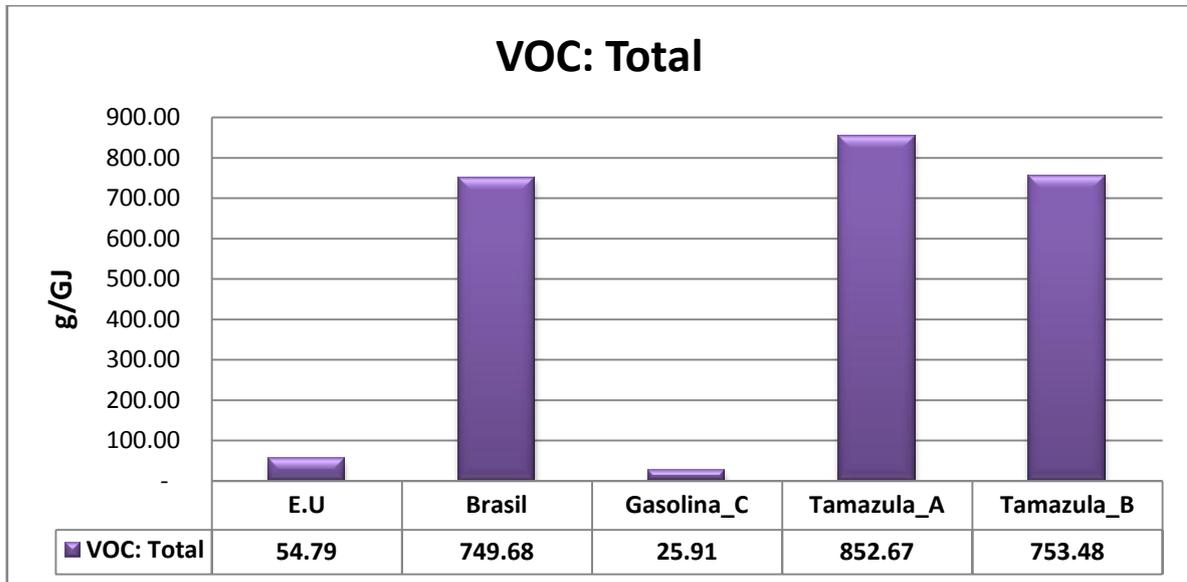


Figura 25: Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC).

#### 4.6 Monóxido de carbono (CO)

Las emisiones de CO, provienen de la combustión incompleta de la biomasa que se quema a cielo abierto en los campos de cultivo, así como del bagazo que se quema en las calderas. Otra fuente de emisión es durante la fermentación del jugo de caña, sin embargo, esta no es muy significativa. Es por ello que en la figura 26, se evidencia que en los procesos en donde interviene la caña de azúcar como materia prima. Se tienen mayores emisiones de de CO. El Tamazula A tiene las mayores emisiones, ya que el proceso es el menos eficiente, al considerarse que las calderas de CFE, cuentan con una baja eficiencia térmica.

El CO, es un contaminante directo que provoca daños a la salud y con el paso del tiempo se transforma en CO<sub>2</sub>.

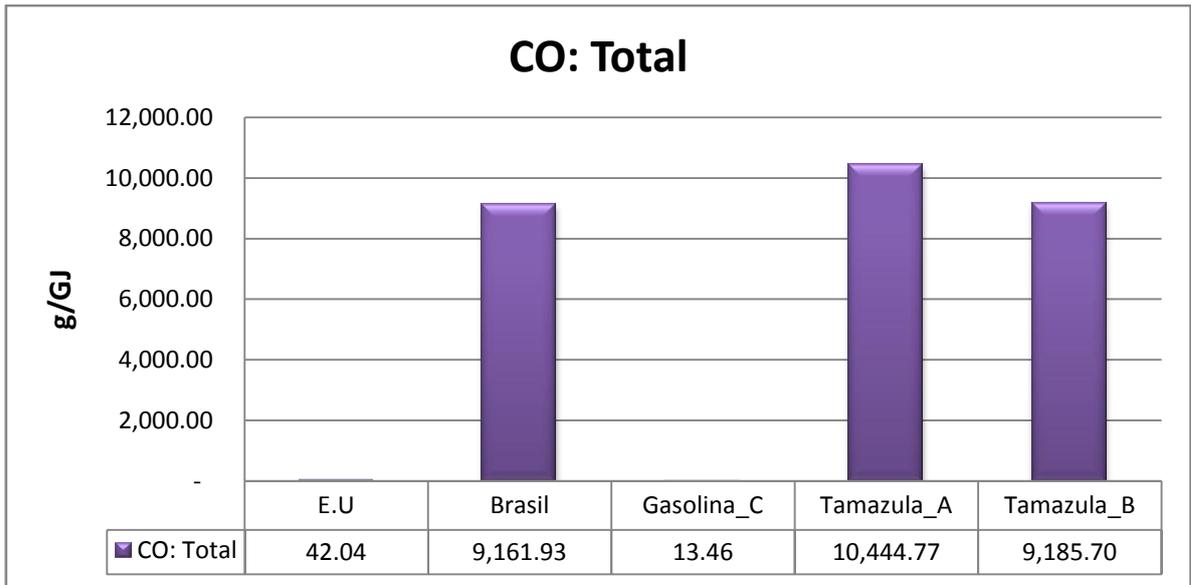
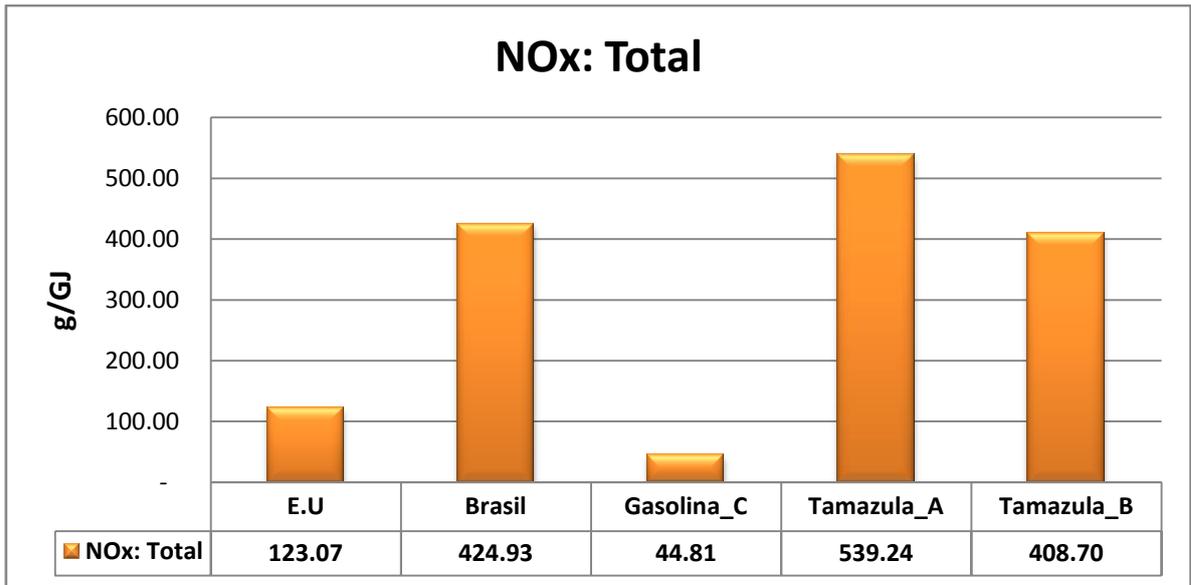


Figura 26: Emisiones de monóxido de carbono (CO).

#### 4.7 Óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>)

Las emisiones de óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>), se generan en los procesos de combustión a lo largo del Ciclo de Vida de la producción de etanol, en la gráfica 11 se observa que en los procesos en donde interviene la caña de azúcar existen mayores emisiones de NO<sub>x</sub>. Esto es propiciado por el proceso de cosecha de la caña de azúcar (quema a cielo abierto) y la utilización del bagazo como fuente de energía, para producir energía eléctrica. Sin embargo, para el caso del Ingenio Tamazula (figura 27), las emisiones de NO<sub>x</sub> son mayores en un 26% a las que se generan en los ingenios de Brasil, una de las razones es por la compra de energía eléctrica a la CFE, por lo que además de quemar bagazo dentro del ingenio, es necesario quemar combustibles fósiles en las plantas generadoras de CFE, para que el ingenio opere adecuadamente.



*Figura 27: Emisiones de Óxidos Nitrosos (NOx).*

#### 4.8 Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)

Al igual que las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO, las emisiones de SO<sub>x</sub>, en los procesos de fabricación de etanol, son mayores a las generadas durante el proceso de fabricación de la gasolina convencional. Esto se puede observar en la figura 28, sin embargo, para el caso del Ingenio Tamazula, el indicador nos muestra que para dicho caso las emisiones de SO<sub>x</sub>, tienen un incremento de 363.74 % , si estas son comparadas con las emisiones que se generan en los ingenios de Brasil. Esto es una consecuencia de la compra de energía eléctrica a CFE. Ya que si se observa el caso Tamazula\_B, es evidente que disminuye dicho indicador, incluso si se compara con Brasil, la disminución esta 1.91 g/GJ.

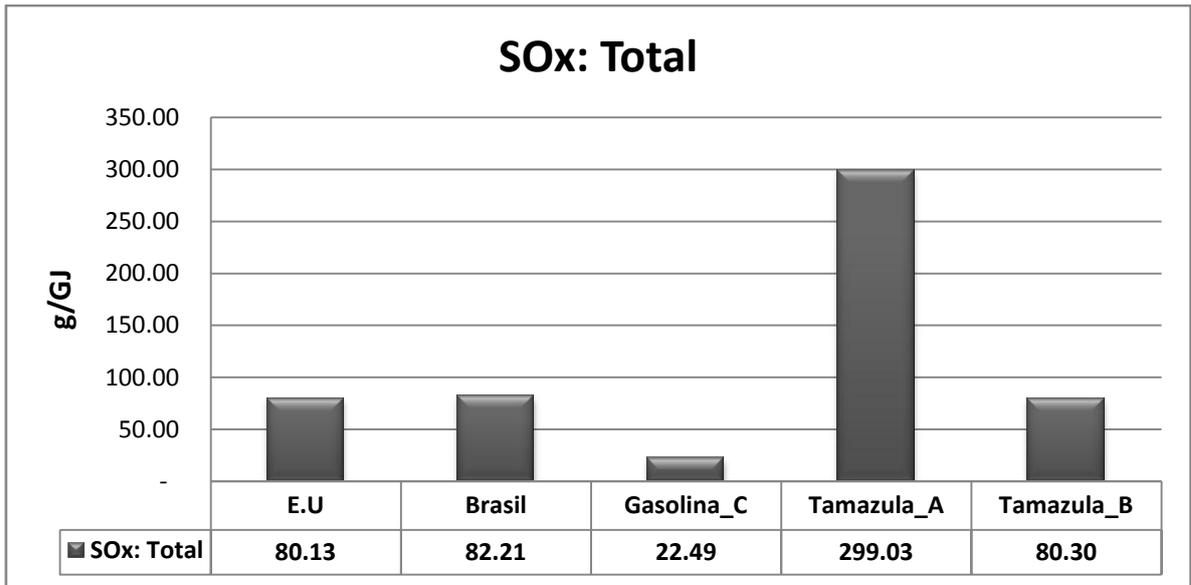


Figura 28: Emisiones de Óxidos de Azufre (SOx).

#### 4.9 Partículas en suspensión PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Las emisiones de partículas en suspensión PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, se generan con mayor intensidad en el proceso de producción de etanol, utilizando caña de azúcar como materia prima. Es evidente que este incremento se debe a la quema de la biomasa durante el proceso.

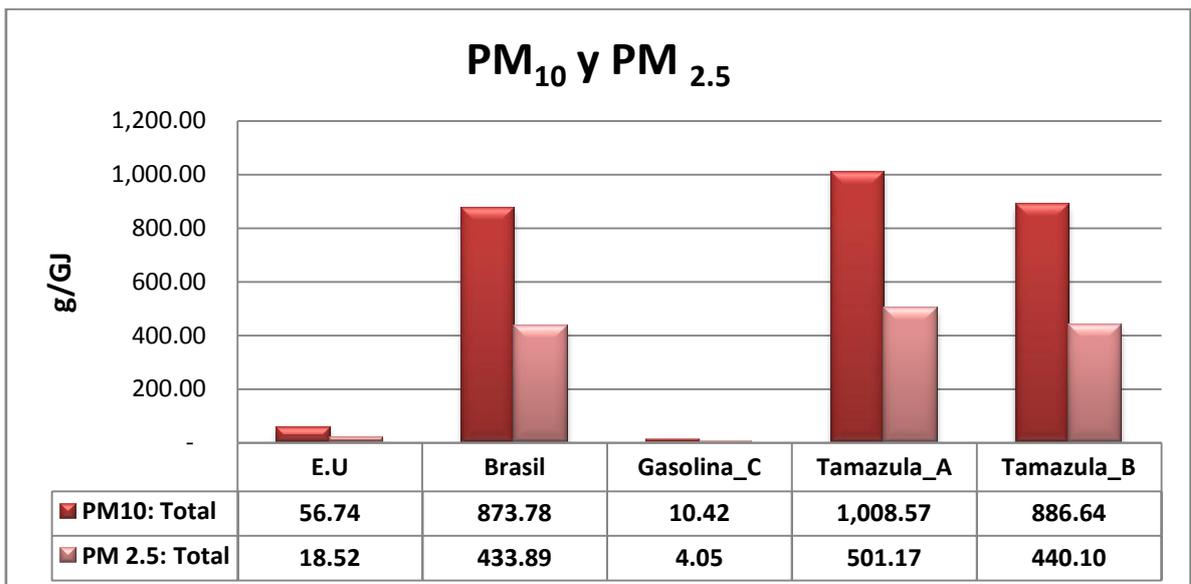


Figura 29: Partículas en suspensión PM10 y PM2.5.

# **Capítulo 5:**

# **Conclusiones**

## 5. Conclusiones

La utilización del modelo GREET en conjunto con visitas de campo y datos encontrados en la literatura, permitieron identificar los puntos críticos del ciclo de vida de la fabricación de etanol para el caso del ingenio Tamazula. Se detectó que la eficiencia de la producción de etanol para el caso Tamazula A, es de 80 litros de alcohol por tonelada de caña, con un consumo de 0.757 kWh de energía eléctrica de CFE por litro de alcohol. Esto hace que se consuma 20% más de energía no renovable y emita 105% más de GEI con respecto al caso de Brasil.

Al incrementar la producción en 90 l/t de caña y eliminar la compra de energía eléctrica a CFE así como generar energía eléctrica mediante el bagazo, se obtuvo el caso Tamazula B. En este caso, se consume 20% más de energía renovable, 60% menos de no renovable y se emite 17.28% más de GEI con respecto al caso de Brasil. Este caso lo hace comparable con el de Brasil.

Las modificaciones que se deben de hacer en el ingenio Tamazula, deberán enfocarse a la autonomía energética (energía eléctrica) y a la eficiencia de producción, ya que el caso Tamazula A, se encuentra en desventaja energética comparado con el caso de la gasolina convencional, consumiendo 162.18% más de energía no renovable. Aun así, aunque no es el caso óptimo, se deja de emitir 88.5% de emisiones de GEI y todavía tendría la ventaja de disminuir GEI's

Si bien para la fabricación de etanol se consume hasta un 568% más de energía para Tamazula B y el caso Brasil que para el caso de la gasolina convencional, los procesos de producción de etanol por medio de caña de azúcar consumen hasta un 43.15% menos de energía no renovable. Por esta razón el proceso de fabricación de etanol por caña de azúcar tiene ventajas para reducir el consumo de energía no renovable.

Tanto para los casos de Tamazula a y B, la quema a cielo abierto y la quema de bagazo como combustible sólido en calderas, propicia que las emisiones de VOC, CO y NO<sub>x</sub> se incrementen respectivamente 1,556%,

24,844 % y 438%, en comparación con el caso de etanol de Estados Unidos y un 13%, 14% y 27% respectivamente, con el caso de Brasil. Se deben de realizar trabajos a futuro sobre éste problema por sus consecuencias a la salud, tecnificando el campo con el propósito de eliminar la quema a cielo abierto.

El caso de Tamazula A incrementa hasta 9,679% de emisiones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , con respecto a la gasolina convencional. El caso Tamazula B incrementa estas emisiones a 8,509% con respecto a la fabricación de gasolina convencional.

Las emisiones de  $SO_x$ , en el caso de Tamazula A son mayores en un 200% con respecto a todos los casos, como una consecuencia de la compra de energía eléctrica a CFE. Esto remarca que la operación actual del Ingenio Tamazula no es la más óptima. Al modificar las condiciones actuales y obtener el caso Tamazula B, la situación mejora y es equiparable con el caso de Brasil, en consumo de energía y balance de GEI.

Se concluye que el Ingenio Tamazula podría ser competitivo en cuanto a balance de energía y emisiones de GEI siempre y cuando se sustituya la compra de electricidad a CFE por generación de energía eléctrica del bagazo. También se pueden reducir las emisiones de  $VOC$ ,  $CO$  y  $NO_x$  evitando la quema de de caña a cielo abierto.

Por otra parte trabajos futuros deberán de estar encaminados a diseñar una logística adecuada para el proceso de transporte, distribución, y almacenamiento del ingenio Tamazula al lugar de consumo, que podría ser la ciudad de Guadalajara. Esto se puede realizar extendiendo el uso del modelo GREET, que contempla esta posibilidad.

## Bibliografía

- Agronegocios, (2008) "Perspectivas de la producción de Biocombustibles en México".
- International Energy Agency (2010) "Key World Energy Statistics", Paris.
- Wang M., Wu May, Huo Hong, (2007) "Life-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emission Impacts of Different Corn Ethanol Plant Types", Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory.
- Baker A., Zahniser S., (2007) "Ethanol Reshapes the Corn Market", Perspectives on food and farm policy: Rural Development & Energy. Vol. 5, Special Issue, USDA. May.
- ALTENER (2000) <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/altener.htm>, consultada 20/06/2010
- Masera C., Rodríguez M., Weber M., (2006) "*Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*". Secretaría de Energía.
- Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2005/2006, Union Nacional de Cañeros A.C.
- Masera C., Rodríguez M., Weber M., (2006) "*Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*". Secretaría de Energía.
- Secretaría de Energía, (2008) "*Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*", Diario Oficial de la Federación.
- Schifter Isaac, López Salinas E.,(1998) "Usos y Abusos de las Gasolinas", Fondo de Cultura Económica.
- V. Irastorza, V.D. González, B. Navarrete, G. Guerrero, M.A. Cabrera, (2007) "*Prospectiva del Mercado de Petróleo Crudo 2007–2016*", Primera Edición, Secretaría de Energía, México.
- García L., (2004) "Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales", Universidad Politécnica de Cataluña.
- Basic Principles of Life-Cycle Assessment (LCA), (2007) INCOMIA.
- Delucchi Mark A. (2007) "Lifecycle Analyses of Biofuels", Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.
- ISO(2006) 14040, International Standard Organization, Ginebra, Suiza.
- ISO (2007), *Norma ISO 14041: Gestión Ambiental- Análisis del Ciclo de Vida- Definición del objetivo y alcance y análisis del inventario*, International Standard Organization, Ginebra, Suiza.
- Farrell A., Plevin R., Turner B., Jones A., O'Hare M., Kammen D., (2006) "*Ethanol Can Contribute To Energy and Environmental Goals*", Energy and Resources Group (ERG). University of California, Berkeley CA 94720, USA.
- Burnham A. (2009) "*User Guide for the GREET Fleet Footprint Calculator 1.1*", Argonne National Laboratory.
- Goedkoop M., De Schryver A., Oele M., Durksz S., De Roest D., (2010) "*Introduction to LCA with SimaPro 7*", PRé Consultants.

IFU Hamburg (2011), Umberto 5 Carbon print model, Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH. [www.umberto.de](http://www.umberto.de). Consultado 20 de mayo 2011.

Bergsma G., Vroonhof J., Dornburg V., (2006) "*The greenhouse gas calculation methodology for biomass-based electricity, heat and fuels*", CE Delft.

Wang M., Wu M., Huo H., Liu J., (2007) "*Well-to-Wheels Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Brazilian Sugarcane Ethanol Production Simulated by Using the GREET Model*", Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory.

Macedo I., Seabra J., Silva J., (2007) "*Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020*", Elsevier.

## Anexo I: Ley de biocombustibles

### 1. Países que se comprometieron en el protocolo de Kioto a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

País	Compromiso cuantificado de limitación o reducción de las emisiones (% del nivel del año o período de base)
Alemania	92
Australia	108
Austria	92
Bélgica	92
Bulgaria	92
Canadá	94
Comunidad Europea	92
Croacia	95
Dinamarca	92
Eslovaquia	92
Eslovenia	92
España	92
Estados Unidos de América	93
Estonia	92
Federación de Rusia	100
Finlandia	92
Francia	92
Grecia	92
Hungría	94
Irlanda	92
Islandia	110
Italia	92
Japón	94
Letonia	92
Liechtenstein	92
Lituania	92
Luxemburgo	92
Mónaco	92
Noruega	101

Nueva Zelanda	100
Países Bajos	92
Polonia	94
Portugal	92
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte	92
República Checa	92
Rumania	92
Suecia	92
Suiza	92
Ucrania	100

## 2. Capacidad instalada para producir alcohol de los ingenios azucares más importantes en México.

Ingenio	Capacidad Instala Litros/Zafra	Producción Zafra 2002/2003	Producción Zafra 2007/2008
<b>Aarón Sáenz</b>	8,550,000	4,948,000	S/P
<b>Calipam</b>	2,400,000	990,261	S/P
<b>Constancia</b>	9,000,000	4,997,400	2,366,399
<b>El Carmen</b>	5,400,000	2,923,000	S/P
<b>El Mante</b>	7,200,000	5,082,300	S/P
<b>Independencia</b>	4,500,000	125,908	S/P
<b>La Joya</b>	4,200,000	1,307,000	S/P
<b>La Providencia</b>	7,500,000	1,818,471	S/P
<b>Pujilic</b>	10,000,000	3,373,004	9,006,145
<b>San José de Abajo</b>	7,500,000	1,118,000	S/P
<b>San Nicolás</b>	12,000,000	2,547,683	4,645,552
<b>San Pedro</b>	7,500,000	3,206,000	S/P
<b>Tamazula</b>	7,500,000	5,643,750	3,409,430
<b>Total</b>	<b>89,250,000</b>	<b>39,205,777</b>	<b>19,427,526</b>

### 3. Puntos importantes de la ley de promoción y desarrollo de los Bioenergéticos.

## LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS

### TITULO I

#### CAPITULO I

##### DISPOSICIONES GENERALES

**Artículo 1.-** La presente Ley es reglamentaria de los artículos 25 y 27 fracción XX de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, es de observancia general en toda la República Mexicana y tiene por objeto la promoción y desarrollo de los Bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano y establece las bases para:

I. Promover la producción de insumos para Bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país de conformidad con lo establecido en el artículo 178 y 179 de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable.

IV. Procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero, utilizando para ello los instrumentos internacionales contenidos en los Tratados en que México sea parte.

### CAPÍTULO II

#### DE LA COMISIÓN INTERSECRETARIAL PARA EL DESARROLLO DE LOS BIOENERGETICOS

**Artículo 8.** Se crea la Comisión de Bioenergéticos, la cual estará integrada por los titulares de la SAGARPA, SENER, SEMARNAT, la Secretaría de Economía y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, la cual tendrá las siguientes funciones:

I. Participar en el marco del Plan Nacional de Desarrollo y de los programas sectoriales, en la elaboración de programas de corto, mediano y largo plazos, relacionados con la producción y comercialización de insumos, y con la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la

comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos. En lo relativo a la producción y comercialización de insumos se escuchará la opinión de la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sustentable;

**VI.** Fomentar la agroindustria y la inversión e infraestructura necesarias, así como el uso de tecnologías eficientes para la producción y comercialización de insumos y para la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos;

### **CAPÍTULO III DE LAS AUTORIDADES COMPETENTES**

**Artículo 11.-** Para los efectos de la presente Ley, la SAGARPA, tendrá las siguientes facultades:

**III.** Evaluar periódicamente el impacto en materia de seguridad y soberanía alimentaria y desarrollo rural, de los programas derivados de esta Ley, incluyendo un análisis de costo beneficio y realizar las acciones necesarias a efecto que dicha información sea de carácter público;

**IV.** Elaborar el Programa de producción sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico;

**Artículo 13.-** Para los efectos de la presente Ley, la SEMARNAT, tendrá las siguientes facultades:

**I.** Prevenir, controlar o evitar la contaminación de la atmósfera, aguas, suelos y sitios originada por las actividades de producción de Insumos y de Bioenergéticos, así como las descargas de contaminantes a los cuerpos de aguas nacionales que se generen por las mismas;

**IV.** Vigilar para que no se realice el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola con el fin de establecer cultivos para la producción de Bioenergéticos;

**TITULO III**  
**CAPÍTULO II**  
**DE LA INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN**

**Artículo 19.-** La SAGARPA y la SENER apoyarán la investigación científica y tecnológica para la producción y uso de los Bioenergéticos, así como la capacitación en estas materias y tendrán como propósitos esenciales:

- I. Fomentar y desarrollar la investigación científica para la producción sustentable de insumos destinados a la producción de Bioenergéticos;
- II. Fomentar y desarrollar la investigación de tecnologías de producción, distribución y uso de los Bioenergéticos;

## Anexo II: Modelo GREET

### Modelo GREET

A partir de 1998 el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés), promovió el proyecto de ciudades limpias, por lo cual recurrió al Laboratorio Nacional de Argonne (Argonne), para que se encargara de diseñar una herramienta para ayudar a las zonas metropolitanas y las coaliciones de Ciudades Limpias en la estimación de contaminantes atmosféricos de criterio, las reducciones logradas por la introducción a corto plazo de los vehículos con combustibles alternativos y el análisis de combustibles alternos.

Argonne ha desarrollado el modelo GREET, el cual está basado en medir el consumo de energía y las emisiones de GEI, durante el ciclo de vida de los combustibles líquidos y vehículos potenciales a utilizarlos. Así también toma en cuenta el uso de petróleo para generar dichos combustibles alternos y el desplazamiento que éste tiene al utilizar nuevas fuentes de energía.

Los usuarios de modelo GREET rápidamente pueden insertar sus datos para obtener las emisiones de GEI y el uso de energía total. Obteniendo resultados desde que se obtiene la materia prima y hasta que llega el centro de reparto (Well-to-Pump) o bien hasta su uso final (Well-to-Whells), para el caso de los combustibles alternos. Para el caso de los vehículos el modelo simula desde que se obtiene la materia prima, hasta que el automóvil es comprado por un usuario.

Sin embargo, es importante señalar que las aplicaciones de este modelo están diseñadas para la situación actual de Estados Unidos, por lo que los usuarios que utilicen el modelo GREET, para escenarios diversos, tendrán que hacer modificaciones de acuerdo a sus necesidades.

A continuación se explica como hace el cálculo de las emisiones para cada etapa en el modelo GREET.

## Calculo de las emisiones para cada etapa del ciclo de combustible

Las emisiones de VOC, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> para una etapa particular se calculan en gramos por millón de BTU de rendimiento de combustible de la etapa. Emisiones durante una etapa incluyen los procedentes de la quema de combustibles de proceso, fugas de combustible y la evaporación, y otras fuentes de emisión. Las emisiones de la combustión de combustibles proceso para una etapa particular se calculan utilizando la siguiente fórmula:

$$E_i = \sum_j \sum_k EF_{i,j,k} \times FC_{j,k} \div 1,000,000$$

Donde:

$E_i$  = Emisiones del contaminante  $i$  en  $g/10^6$  Btu

$EF_{i,j,k}$  = Factor de emisión del contaminante  $i$  en el proceso de combustión  $j$ , con la tecnología de combustión  $k$  en  $g/10^6$  Btu

$FC_{j,k}$  = Consumo del combustible en el proceso  $j$  con la tecnología  $k$  en  $Btu/10^6$  Btu del combustible producido.

Los factores de emisión de VOC, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, por diferentes procesos de producción de combustibles en diversas tecnologías son derivados de la quinta edición de la norma EPA AP-42 (EPA 1995).

En el modelo GREET, las emisiones de CO<sub>2</sub> son calculadas por el balance de carbono, en donde la cantidad de carbono que está contenido en el combustible que se quema menos el carbono contenido en las emisiones de VOC, CO y CH<sub>4</sub> durante la combustión que se convertirán en CO<sub>2</sub>. La siguiente fórmula se utiliza en el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>:

$$\text{CO}_2 = \left[ \rho \div \text{LHV} \times 1,000,000 \times \text{C\_ratio} - \left( \frac{\text{VOC} \times 0.85 + \text{CO}}{\times 0.43 + \text{CH}_4 \times 0.75} \right) \right] \times 44 \div 12$$

Donde:

$\text{CO}_2$  = Emisiones de  $\text{CO}_2$  de la combustión de un combustible y tecnología en particular en  $\text{g}/10^6$  Btu

$\rho$  = Densidad del combustible en g/gal

LHV = Rangobajo del poder calorífico del combustible quemado.

C\_ratio = Relación del carbono en peso para el combustible quemado.

VOC = Factor de emisiones de VOC de la combustión del combustible en una determinada tecnología en  $\text{g}/10^6$  Btu del combustible quemado.

0.85 = Proporción estimada de carbono en peso para las emisiones de VOC.

CO = Factor de emisiones de CO de la combustión del combustible en una determinada tecnología en  $\text{g}/10^6$  Btu del combustible quemado.

0.43 = Proporción estimada de carbono en peso para CO.

$\text{CH}_4$  = Factor de emisiones de  $\text{CH}_4$  de la combustión del combustible en una determinada tecnología en  $\text{g}/10^6$  Btu del combustible quemado.

0.75 = Proporción estimada de carbono en peso para  $\text{CH}_4$ .

44 = Peso molecular de  $\text{CO}_2$ .

12 = Peso molecular del carbono.

Las formulas que se han presentado requieren de especificar correctamente datos como son: poder calorífico, densidad de combustible y peso del carbón. Las especificaciones de los diversos combustibles están incluidas en el modelo GREET. En todo el modelo, se utiliza el valor inferior del poder calorífico para todos los combustibles.

## Anexo III: Proceso de producción del etanol

### 1. Proceso de producción de etanol a través de la caña de azúcar

La adaptación de cada suelo particular a los requerimientos de la caña de azúcar, se logra mediante una adecuada preparación, en la cual se deben satisfacer al menos, los siguientes objetivos:

- Destruir e incorporar al suelo malezas y/o residuos de cosechas anteriores.
- Romper y descompactar el suelo para facilitar la penetración del agua y de las raíces.
- Mejorar la estructura del suelo.
- Destruir los grandes terrones que pueden afectar posteriores labores de cultivo.
- Mejorar y facilitar la distribución del agua de riego.
- Drenar los excedentes de agua de lluvia o de riego.
- Proveer un adecuado lecho donde los esquejes puedan ser tapados uniformemente y donde puedan disponer de adecuadas condiciones de humedad y aireación.

El objetivo de esta fase es dejar el terreno en condiciones de laboreo, listo para recibir la semilla. Para ello, la fase comprende actividades varias.

#### 1.1 Limpia del terreno

La limpia del terreno implica la eliminación de la maleza, este proceso puede hacerse con chapeadora, a mano o mediante rastreo.

La maleza no sólo se debe eliminar sino que se puede controlar a través del conocimiento de las características de la misma y de su grado de interferencia con el desarrollo de la caña. A través de las labores de cultivo

entre surco, el desyerbe y el uso de herbicidas y sus posibles combinaciones, se debe buscar un manejo técnicamente efectivo y económicamente más viable.

Después del control de maleza es necesario realizar el barbecho de la tierra que consiste en meter el arado para voltearla y permitir que la maleza se integre, como nutrientes, al terreno. En caso de que por algún motivo no haya quedado parejo el terreno será necesario llevar a cabo un segundo barbecho —cruza— para poder desmoronar mejor los terrones que quedaron del primer barbecho.

## **1.2 Rastreo**

Una vez realizado el barbecho será necesario llevar a cabo el rastreo que tiene por objetivo desmenuzar los terrones grandes que dejó el barbecho y que pueden obstaculizar las posteriores labores de labranza; con el rastreo también se busca emparejar el terreno, para que facilite el manejo del agua una vez que se inicie el riego.

## **1.3 Nivelación**

El objetivo de la nivelación es acondicionar el relieve o topografía del terreno a fin de mejorar la eficiencia del riego, el drenado del exceso de agua de las lluvias o del riego. Algunas labores de nivelación pueden estar destinadas a eliminar pequeñas irregularidades del terreno e incluso de las realizadas por la utilización de algunos de los implementos agrícolas. Otras son consideradas como labores de nivelación mayor dado que se requerirá de realizar cortes o rellenos de gran consideración al terreno.

## **1.4 Subsulado**

Es una labor de labranza que tiene por objetivo romper estratos o capas compactas del suelo con la utilización de fuerza de tracción y busca permitir una mejor penetración del agua y de las raíces de la planta.

## **1.5 Surcado**

El surcado es la última labor de la preparación del suelo para la siembra. El trazado de los surcos se hace en función del riego, del drenaje y de la mecanización del cultivo, especialmente la de la cosecha. En las zonas donde la topografía del terreno no permite una buena labor de nivelación, se sigue utilizando el diseño tradicional. Pero donde si se puede lograr una buena nivelación del terreno, que permita el trazado de surcos rectos y largos y una más eficiente labor de los equipos de cosecha mecanizada. La separación entre surcos va desde 1.1 hasta 1.5 metros. El surcado de mayor amplitud se realiza cuando de antemano ya se sabe que se va a llevar a cabo un cosechado mecánico y se hace para permitir la entrada de la maquinaria agrícola.

## **2. Siembra y variedades de caña**

Paralelamente a esta actividad de preparación del terreno, se decide la variedad de la caña que se va a sembrar. Para tal caso, lo primero que se debe hacer es seleccionar un semillero. Si no se cuenta con uno, lo que debe cuidar el productor es que la cepa no corresponda a una variedad cuya resoca sea de cinco años.

Es recomendable que la semilla sea seleccionada de una soca dado que los entrenudos son más cortos y eso permitirá que haya una mayor cantidad de yemas por metro lineal, lo que se traducirá en una mayor densidad de yemas en la siembra y, por lo tanto, una mayor posibilidad de crecimiento de plantas.

### **2.1 Siembra de la caña**

Para la siembra de la caña el primer paso es su corte. En este proceso el corte se hace a mano y se realiza lo más al ras del suelo posible. La caña que se corta para semilla debe ser cruda. El cortador debe quitarle la paja de tal manera que a la hora de llegar al lugar donde se va a sembrar se haga con la menor cantidad de hojarasca posible. La labor que hace el cortador debe ser muy meticulosa, dado que la hoja es el complemento de la vaina, la cual a su

vez es la corteza que cubre el tallo de la caña y, debajo de esa vaina, está la yema que es donde va a brotar la nueva caña.

El traslado de la caña a los terrenos donde se va a llevar a cabo a siembra puede hacerse de diversas maneras. Dependiendo el nivel de tecnificación y del tipo de infraestructura en camino, este proceso se puede realizar en camiones, carretas o animales de carga. Una vez en el terreno, en la mayoría de los ingenios, principalmente en los de régimen de temporal, la caña se tira entre el surco y, el sembrador con el machete lo va trozando procurando que los trozos sean de entre 50 y 60 centímetros. Al terminar el troceado, el sembrador regresa sobre el surco para ir acomodando la caña, los trozos de ésta deben quedar traslapados unos con otros. El traslape que se hace en la mayoría de los ingenios es el de **medio petatillo**, en algunos otros se realiza el **petatillo completo**.

Es importante que se de un proceso de cuidado de la semilla, lo cual implica que los sembradores conozcan y estén en condiciones de aplicar enraizadores y desinfectantes. En México la utilización de ambas técnicas del cuidado de la semilla es importante ya que en aproximadamente el 65% de la tierra el cultivo se hace con el modo de temporal; no se realiza un proceso de emparejamiento del terreno, lo cual provoca que el terreno presente depresiones y que se generen encharcamientos que pudren la yema.

### 2.3 Riego

La caña permanece en el campo durante entre 12 meses, por ello requiere de la aplicación de agua complementaria para su crecimiento, al menos durante el periodo de sequía. El suministro de agua por riego depende de la variedad de la planta y del control que se pueda tener de la maduración de la caña y, finalmente del volumen de azúcar que se puede lograr con un mayor o menor riego.

Inmediatamente después de la siembra, se aplica el primer riego o **riego de asiento**, cuyo objetivo es humedecer y poner la tierra en contacto directo con la semilla de la caña, buscando que se aproveche al máximo la humedad y

temperatura del medio. En el primer riego se debe cuidar que el arrastre de suelo no deje al descubierto los trozos que se han sembrado.

Durante la germinación, en general, la demanda de agua es muy baja, especialmente porque las plantas se encuentran en su fase de desarrollo y de que su zona radicular es muy reducida. Los periodos de riego suelen ser muy cortos en esta fase, a fin de mantener con un lato grado de humedad la capa o costra de suelo que cubre la semilla, evitando un sobre endurecimiento del terreno y que ello obstaculice que el brote emerja.

La siembra de la caña se lleva a cabo en un periodo de tiempo que va de octubre a febrero. Este periodo permitirá tener caña para corte entre 12 y 18 meses después de la siembra, dependiendo del tipo de terreno y de la variedad de caña que se haya sembrado.

#### **2.4 Cosecha de la caña**

En el caso de que la caña haya sido sembrada, es recomendable iniciar acciones de preparación para la cosecha a los nueve meses de realizada la siembra. El objetivo de iniciar estas actividades es el de lograr llevar al ingenio una caña en óptima calidad, que permita una buena producción de mieles, lo cual es posible mediante la manipulación de algunos factores: moderar el riego o humedad o provocando una sequía moderada; provocar hambre de nitrógeno en la planta a fin de disminuir o restringir el proceso de crecimiento de la planta; favorecer la acumulación de azúcares producidos.

La cosecha es una labor costosa y difícil, de la oportunidad en su ejecución depende el aprovechamiento o desperdicio de sacarosa producida durante todo el ciclo de cultivo. Comprende el corte, el alza y el acarreo de la caña hasta el ingenio; operaciones todas ellas que deben realizarse con una gran sincronía, cuidando que la caña que se corte se entregue para su beneficio antes de iniciar su proceso natural de deterioro y de que se degraden los azúcares que contiene.

El procedimiento más común en la cosecha, consiste en quemar el área que se va a cortar, la finalidad de esta quema es que los cortadores no tengan problemas con la maleza que ha crecido y a la vez que no exista fauna que

pueda provocar accidentes. Una de las formas más modernas es el uso de maquinaria de corto, la ventaja de utilizar una máquina es que no se tiene que hacer quema a cielo abierto y se requiere de menor tiempo para el corte. Por el contrario una desventaja es que para los pequeños productores resulta ser muy costoso.

## 2.5 Transporte al ingenio

El transporte de la caña del campo al ingenio implica no sólo su transporte sino cuidar que el aprovisionamiento de caña al ingenio sea el adecuado para la molienda que se ha programado previamente. Se debe cuidar también que el tiempo de traslado no incida en que la caña pierda su nivel óptimo de sacarosa y entre al proceso en condiciones que permitan su mejor aprovechamiento.

La caña que se transporta desde los campos al ingenio llega a las básculas donde se toma el peso bruto que llega. De las básculas los camiones son trasladados hacia el área del ingenio en la que serán descargados mediante la utilización de alguno de tres sistemas existentes. El primero implica la utilización de una grúa radial que toma con un par de ganchos el bulto de caña del camión y, girando, lo coloca sobre la mesa de recepción de la caña. El sistema de hilo requiere de contar con un transporte especializado que posibilite que la zona de carga se levante de un lado con dos cuerdas o hilos y se vierta el contenido sobre la mesa de recepción. Y finalmente, un tercer sistema de descarga de la caña de los camiones que la transportaron es la utilización de una grúa hidráulica que levanta el camión provocando que por gravedad descargue su carga sobre la mesa de recepción de la caña en el ingenio.

En la mayoría de los ingenios en traslado se hace en camiones con capacidad para 30 toneladas y el promedio de la distancia al ingenio, para el caso de Tamazula, es de 30 km.

### **3. Proceso en ingenio**

Una vez que la caña de azúcar entra a la fábrica, se procede a tomar una muestra de cada camión, para conocer la riqueza en glucosa que se tiene, de esa forma se decide el momento en que la caña entrará al molino y será acondicionada para el proceso.

#### **3.1 Acondicionamiento**

El acondicionamiento consiste de un lavado inicial de la caña con agua a 40°C y posteriormente una molienda o trituración donde se extrae el jugo azucarado con agua a 60°C, retirando como subproducto el bagazo con un contenido en fibra de alrededor del 46%, que puede ser utilizado en la generación de vapor y por lo tanto en la producción de energía eléctrica.

El jugo de caña obtenido se somete a un proceso de clarificación en el que se le agrega óxido de calcio y una pequeña porción de ácido sulfúrico con el fin de disminuir el pH a 4,5 y provocar la hidrólisis de la sacarosa en hexosas. En el recipiente clarificador se precipita un lodo, que debe ser retirado y enviado a un filtro rotatorio al vacío. De este filtro se obtiene una torta conocida como cachaza y un filtrado que es retornado al recipiente de clarificación. Finalmente el jugo proveniente de la clarificación es esterilizado a 105°C y enviado a la fermentación, a la cual debe ingresar con un contenido en azúcares entre 130-180 g/L.

#### **3.2 Proceso en la fábrica de alcohol**

Una vez que se obtienen las mieles en el proceso de acondicionamiento, las mieles de tipo A que son las de mayor calidad, se destinan a la producción de azúcar y las mieles de tipo B (menor calidad), se destinan a la producción de alcoholes.

Las mieles tipo B, ingresan a la fabrica en 85° Brix., por lo que hay que agregar agua para poder diluir hasta llegar a 15° Brix, una vez que se ha

estabilizado la mezcla se agregan levadura, sales y ácido sulfúrico, para generar una levadura especial a 11° Brix., la cual será nuevamente mezclada con las mieles que fueron diluidas y llevar a cabo la fermentación de la glucosa.

### **3.3 Separación y deshidratación**

La destilación y la adsorción con tamices moleculares se usan para recuperar el etanol del caldo de fermentación obteniéndose etanol a 99,5% en peso de pureza. La destilación se lleva a cabo en dos columnas, la primera remueve el CO<sub>2</sub> disuelto (que es enviado a la torre de absorción) y la mayoría del agua obteniéndose un destilado con 50% en peso de etanol y unos fondos con una composición inferior al 0,1% en peso; en esta columna se alimenta junto al caldo de fermentación el etanol recuperado en la absorción proveniente de los gases de fermentación. La segunda columna concentra el etanol hasta una composición cercana a la azeotrópica.

El agua restante es removida de la mezcla mediante adsorción en fase vapor en dos lechos de tamices moleculares. El producto de la regeneración de los tamices es recircular a la segunda columna de destilación. Finalmente pasa por la última columna para obtener el producto final y al almacén en donde el producto se encuentra disponible.

### **3.4 Tratamiento de efluentes**

De las aguas de residuo en el proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar las de mayor volumen son aquellas que provienen de los fondos de la primera columna de destilación, conocidas como vinazas. El tratamiento propuesto consiste en su evaporación y posterior incineración. La función del tren de evaporación (cuatro efectos) es concentrar los sólidos solubles y demás componentes poco volátiles presentes en las vinazas hasta un valor cercano al 12% en peso, ya que en esta concentración se hacen aptas para su incineración. Los condensados de los evaporadores son recolectados junto con los fondos de la segunda columna de destilación y utilizados como agua de proceso.

### 3.5 Almacén y transporte

Una vez que se obtiene el producto final, este se coloca en el almacén con la finalidad de estar disponible para el consumo final. Para el caso de los ingenios mexicanos, el producto se entrega en radios de no más de 50 km, y el medio de transporte son los camiones-tanque.

## Anexo IV: Premios y participaciones



La Red Mexicana de Bioenergía  
otorga el presente

# RECONOCIMIENTO

a:

Manriquez García J., Cervini Silva J., Jazcilevich Diamant A.

Por haber obtenido el primer lugar en la categoría “Investigación aplicada” en el concurso de trabajos técnicos celebrado durante la  
**VII Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía, A.C.**

con la ponencia:

**Análisis de Ciclo de vida para el etanol: Caso de estudio Ingenio Tamazula**

25-28 de Octubre 2010, en Cuernavaca, Morelos

  
Omar Masera Cerutti  
Presidente





La Red Mexicana de Bioenergía  
otorga la presente

**CONSTANCIA**

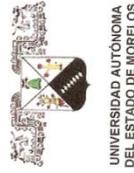
a:

**Manríquez García J., Cervini Silva J., Jazcilevich Diamant A.**

Por su participación en la  
**VIII Reunión Nacional de la Red Mexicana  
de Bioenergía, A.C.**  
con la ponencia:

Análisis de Ciclo de vida para el etanol:  
Caso de estudio Ingenio Tamazula  
25-28 de Octubre 2010, en Cuernavaca, Morelos

  
**Omar Masera Cerutti**  
Presidente





El Comité Organizador otorga la presente

# CONSTANCIA

A:

Manríquez García J.\*, Cervini Silva J., Jazcilevich Diamant A.

Por su valiosa participación como PONENTE con el tema "ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL ETANOL: CASO DE ESTUDIO INGENIO TAMAZULA" en el marco del Congreso Internacional sobre Biocombustibles 2011.

World Trade Center de Boca del Rio, Veracruz.. México del 12 al 15 de Octubre de 2011.

Dr. Jesús Uresti Gil  
Vicepresidente

Dr. Arturo Pérez Vázquez  
Presidente

Dr. Odilón Sánchez Sánchez  
Secretario







