



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**ETANOL DE PRIMERA GENERACIÓN, ESTUDIO DE  
LA SUSTENTABILIDAD DE SU PRODUCCIÓN  
CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS  
ECONÓMICO-AMBIENTAL DE SU INTRODUCCIÓN  
EN EL SECTOR TRANSPORTE MEXICANO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERIA**

ENERGÍA - ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

P R E S E N T A:

**CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE**

TUTOR:

**Dr. FABIO MANZINI POLI**

**2011**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Best y Brown Roberto

**Secretario:** Dr. Manzini Poli Fabio

**Vocal:** Dr. Maserá Cerutti Omar Raúl

**1<sup>er.</sup> Suplente:** Dr. Islas Samperio Jorge Marcial

**2<sup>do.</sup> Suplente:** Dr. Sorani Dalbón Valentino

Lugar donde se realizó la Tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA - UNAM

TUTOR DE TESIS

**DR. FABIO MANZINI POLI**

---

**FIRMA**

Con profundo amor dedico este trabajo a mis padres, a mis hermanas, a la pequeña que viene en camino y a Gaby. Y muy especialmente, a mi hermana Gabriela.

*A veces nuestro destino se asemeja a un árbol frutal en invierno. ¿Quién pensaría que esas ramas reverdecerán y florecerán? Mas esperamos que así sea, y sabemos que así será – Goethe.*

## **Agradecimientos**

Muchas personas colaboraron directa e indirectamente para que esta tesis fuera posible, en particular quiero agradecer:

Al Dr. Fabio Manzini por la guía, el apoyo y la paciencia durante la elaboración de esta investigación doctoral, ya que sin su apoyo incondicional no habría sido posible. Además agradezco todo el buen humor y las oportunidades que me ayudaron a crecer durante mis estudios de doctorado.

Al Dr. Jorge Islas y al Dr. Omar Masera por seguir de cerca el desarrollo de esta tesis, por sus valiosos comentarios para que el trabajo fuera mejor, y a las oportunidades que me dieron para colaborar en proyectos que me permitieron mejorar mi formación por medio de la aplicación de los conocimientos.

A los doctores Roberto Best, Alfredo Martínez y Valentino Sorani por sus comentarios, críticas y ánimos para mejorar el trabajo.

A Enrique Riegelhapt por compartir generosamente sus conocimientos y por su invaluable ayuda en buena parte del desarrollo de esta tesis, desde discusiones, hasta información específica.

A los técnicos académicos, María de Jesús Pérez Orózco y Genice Grande, por todo su apoyo en la colección de información, asesoría y toda la ayuda que siempre me proporcionaron de forma amable. También al Dr. Víctor Gómez por su guía en el para mi intrincado tema de la termodinámica.

A Jürgen Giegrich, Horst Fehrenbach, Anna Hennecke, Bernd Franke y Andreas Detzel del IFEU, por recibirme en mi estancia de investigación, por las enseñanzas, sugerencias, consejos y oportunidades de colaboración.

A toda la gente de los ingenios Motzorongo, La Gloria, Puruarán y Emiliano Zapata, quienes amablemente me proporcionaron información y en algunos casos, recursos materiales y humanos. En particular quiero agradecer al Ing. Manuel Enríquez Poy.

Por supuesto agradezco a la UNAM y al Centro de Investigación en Energía por permitirme realizar mis estudios de doctorado, y a todos los investigadores y trabajadores del CIE quienes siempre me brindaron ayuda y apoyo.

A los contribuyentes que financiaron mis estudios por medio de una beca otorgada por el CONACyT.

A mis compañeros y amigos del CIE sin los cuales no hubiera podido realizar el trabajo, entre ellos: Amilcar, Aldo, Ulises, David, Bety, Alberto, Miguel, Fabrisio, Fernando, Lupita, Mario, Mario, Ulises, Iván, Rodrigo, Víctor, Cesar, Luis, Tito, Vidal, Liz, y muchos otros quienes seguramente me perdonaran el haber olvidado listar sus nombres.

A mis viejos y recientes amigos del CIEco y de la REMBIO, Alfredo, René, Pavka, Montse, Iván, Jorge, Isaac, Hilda, Fabio, Manuela y otros más.

A mis amigos de toda la vida Carlos, Fernando, Luis, Edgar y Adrián, quienes a pesar de la distancia y los años, siguen aquí.

A la familia García Salazar y a la familia Bustamante Rivas, por mantenerse unidos y pendientes de mi.

A mis padres y a mis hermanas, por el amor, la alegría y las muchas cosas que me han dado. Son para mí una fuente inagotable de fuerza e inspiración.

A mi Gabriela, por el amor y el cariño, por cuidarme y por traer luz a mi vida.

Finalmente quiero agradecer a todos aquellos quienes lucharon y luchan por un país mejor, desde sus respectivas trincheras, con sus abundantes o limitados recursos. Muchas gracias.

## Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>11</b>
Capitulo 1.....	29
1.1 Historia.....	29
1.2 Panorama mundial de la energía.....	30
1.3 El sistema energético.....	32
1.3.1 Problemas del sistema energético mundial.....	33
1.3.1.1 Recursos finitos.....	33
1.3.1.2 Seguridad energética.....	34
1.3.1.3 Disparidad en el uso de la energía y pobreza.....	34
1.3.1.4 El calentamiento global.....	35
1.3.1.5 Otros aspectos ambientales.....	36
1.4 La sustentabilidad energética.....	37
1.5 Las energías renovables.....	39
1.5.1 La bioenergía.....	41
1.5.1.1El Etanol en el Mundo.....	42
1.6 Panorama de la energía en México.....	44
1.6.1 Bioenergía en México.....	46
1.6.2 El Etanol en México.....	47
1.7 Sustentabilidad de la producción de etanol.....	49
1.7.1 Balance energético y emisiones GEI.....	49
1.7.2 Impactos sobre la seguridad alimentaria.....	50
1.7.3 Impactos sobre la disponibilidad de agua.....	51
1.7.4 Factibilidad económica.....	52

1.7.5 Efectos sociales.....	52
Capitulo 2.....	53
2.1 Marco teórico.....	53
2.2 Metodología.....	62
2.2.1 Cultivos y tecnologías de producción potenciales.....	63
2.2.2 Selección de indicadores de sustentabilidad.....	71
2.2.2.1 Indicador energético (Ie).....	71
2.2.2.2 Indicador ambiental (Ia).....	71
2.2.2.3 Indicador consumo de agua (Iua).....	71
2.2.2.4 Indicador uso de suelo.....	72
2.2.2.5 Indicador económico.....	72
2.2.2.6 Indicador social.....	72
2.2.3.1 Balance de emisiones GEI y balance energético.....	73
2.2.3.2 Definición de las fronteras del sistema.....	73
2.2.3.3 Modelo empleado para el ACV.....	75
2.2.3.4 Datos.....	76
2.2.3.5 Unidad Funcional.....	79
2.2.3.6 Supuestos sobre el cambio en el uso de suelo.....	79
2.2.3.7 Asignación (Allocation).....	81
2.2.4 Indicador de consumo de agua.....	82
2.2.5 Indicador uso de suelo.....	83
2.2.6 Indicador económico.....	83
2.2.7 Indicador social.....	84
2.2.8 Agregación de los indicadores en un Índice.....	84
Capitulo 3.....	87



3.1 Indicador ambiental la.....	87
3.1.1 Resultados para etanol de caña de azúcar.....	87
3.1.2 Resultados para etanol de maíz y sorgo grano.....	92
3.2 Indicador energético le.....	95
3.2.1 Resultados para caña de azúcar.....	95
3.2.2 Resultados para maíz y sorgo grano.....	98
3.3 Indicador Uso de agua.....	99
3.4 Indicador Uso de suelo.....	100
3.5 Indicador económico.....	102
3.6 Indicador Social.....	105
3.7 Presentación gráfica de los indicadores.....	106
3.8 Índice de sustentabilidad (ISUS).....	107
Conclusiones.....	113
Referencias.....	116
ANEXO A.....	126
ANEXO B.....	139

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Evolución del consumo energético mundial desde 1800 hasta nuestros días [5].....	30
Figura 1.2 Consumo mundial de energía primaria en 2008\; 475,160 PJ [6].....	31
Figura 1.3 Esquema del sistema Energético. Basado en [1].....	32
Figura 1.4 Incrementos de la temperatura media global, del nivel medio del mar y decremento de la cubierta de nieve del hemisferio septentrional [8].	36

Figura 1.5 Evolución de la energía Primaria Global [58].....	41
Figura 1.6 Consumo en México de Energía primaria en 2008.....	45
Figura 1.7 Consumo e importaciones de gasolina y diesel en México.....	45
Figura 1.8 Ingresos por la venta de petróleo crudo y egresos por la importación de gasolina y diesel.....	46
Figura 2.1 Área potencial de cultivo de caña de azúcar.....	64
Figura 2.2 Área potencial de cultivo de sorgo grano.....	64
Figura 2.3 Cultivos de maíz (temporal).....	65
Figura 2.4 Cultivos de maíz (riego).....	65
Figura 2.5. Procesos industriales para la producción de etanol a partir de caña de azúcar.....	67
Figura 2.6 Proceso de producción de etanol a partir de maíz y sorgo.....	70
Figura 2.7 Fronteras del sistema.....	74
Figura 3.1 Emisiones de GEI para etanol de caña de azúcar, sin cambios de uso de suelo.....	88
Figura 3.2 Emisiones de GEI para etanol con caña de azúcar, con Cambio en el Uso de Suelo.....	92
Figura 3.3 Emisiones GEI en el ciclo de vida de etanol de maíz y sorgo considerando las fases agrícola, la industrial y de transporte, sin CUSd.....	93
Figura 3.4 Emisiones GEI en el ciclo de vida de la producción de etanol de maíz y sorgo con CUSd.....	95
Figura 3.5 Balance energético de las modalidades de producción de etanol de caña para México y para el caso brasileño.....	96
Figura 3.6 Consumo de energía fósil en la producción de etanol de maíz y sorgo.....	98
Figura 3.7 Consumo de agua para la producción de etanol de los diferentes escenarios.....	100
Figura 3.8 Resultados del indicador uso de suelo.....	101
Figura 3.9 Resultados de lec.....	102

Figura 3.10 Resultados de lec.....	103
Figura 3.11 Resultados del indicador social.....	105
Figura 3.12 Resultados de Indicadores de sustentabilidad para la producción de etanol a partir de caña de azúcar.....	106
Figura 3.13 Resultados de Indicadores de sustentabilidad para la producción de etanol a partir de maíz y sorgo grano.....	106
Figura 3.14 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades.....	108
Figura 3.15 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación igual para cada indicador.....	108
Figura 3.16 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación mayor a lec y el resto de indicadores con el mismo peso.....	109
Figura 3.17 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación mayor a lua y el resto de indicadores con el mismo peso.....	109
Figura 3.18 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación mayor a la y el resto de indicadores con el mismo peso.....	110

## Índice de Tablas

Tabla 2.1 Principios ecológicos para la producción de biocombustibles.....	56
Tabla 2.2 Criterios socio-económicos de sustentabilidad.....	57
Tabla 2.3 Modalidades de producción de etanol con posibilidades de aplicación en México.....	69
Tabla 2.4 Modalidades de producción de etanol a partir de maíz y sorgo grano. ....	70
Tabla 2.5 Datos para el cálculo de los ACV.....	77

Tabla 2.6 Datos de insumos, rendimientos y servicios necesarios para el ACV. .....	78
Tabla 2.7 Valores de C para los calculo de emisiones de CO2 por el cambio directo en el uso de suelo.....	80
Tabla 2.8 Ponderación de los indicadores de sustentabilidad por expertos en el tema.....	86
Tabla 3.1 Emisiones de CO2e para diferentes métodos de asignación.....	91
Tabla 3.2 Balance energético de las modalidades de producción de etanol para México y para el caso Brasileño.....	97
Tabla 3.3 Balances energéticos de la producción de etanol de sorgo grano y maíz.....	99
Tabla 3.4 Resultados de Iec.....	102

### **Lista de acrónimos**

DER: Directiva Europe de Energías Renovables

EDJ: Etanol de judo directo de caña

EDJ: Enatnol de jugo directo de caña con venta de electricidad

EMB: Etanol de melaza son uso de combustóleo

EMF: Etanol de melaza con uso de combustóleo

EMBF: Etanol de miel B con uso de combustóleo

Ia: Indicador ambiental

Iec: Indicador económico

Ie: Indicador energético

Ius: Indicaros uso de suelo

Is: Indicador social

Iua: Indicador consumo de agua

ETBE: Etil terbutíl éter

MTBE: Metil terbutíl éter

E10: Mezcla volumétrica 10% etanol y 90% gasolina

E6: Mezcla volumétrica 6% etanol y 94% gasolina

ZMVM: Zona metropolitana del Valle de México

MCMA: Mexico City Metropolitan Area

LDGV: Vehículos ligeros a gasolina

LDGT1: Camionetas ligeras a gasolina 1

LDGT2: Camionetas ligeras a gasolina 2

HDGV: Vehículos pesados a gasolina

MC: motocicletas

LEAP: Long Range Energy Alternatives Planning

CO: Monóxido de carbono

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

NO<sub>x</sub>: Óxidos de Nitrógeno

SO<sub>2</sub>: Dióxido de Azufre

THC: Hidrocarburos Totales

PM10: Partícula menores a 10 micras

EIA: Administración de la Información Energética de Estados Unidos

GEI: Gases de Efecto Invernadero

BP: Petróleo Británico

HDI: Índice de Desarrollo Humano

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente

MDG: Metas para el desarrollo del Milenio

UV: Ultra Violeta

ACV: Análisis del Ciclo de Vida

ISO: Organización Internacional de Estándares

CIE: Centro de Investigación en Energía de la UNAM

AHP: Proceso Analítico de Jerarquización

WBGU: Consejo Consultivo Alemán para el Cambio Global

ML: Millones de litros

IPCC: Panel Intergubernamental para el Cambio Climático

CB: Costo beneficio

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SMA: Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal

SEN: Sistema Eléctrico Nacional

IFEU: Instituto de Energía y Ambiente, Heidelberg, Alemania

EBAMM: Metamodelo para el Análisis de Biocombustibles, Grupo de Energía y Ambiente de la Universidad de California en Berkeley

GREET: Modelo para el Cálculo de GEI, Emisiones Reguladas y Uso de Energía en el Transporte. Laboratorio Nacional ARGONNE, Estados Unidos

CA-GREET: Modificación del gobierno de California al modelo GREET

RTFO: Obligación de Combustibles Renovables para el Transporte, Reino Unido

TPCA: Tasa Promedio de Crecimiento Anual

Mha: Millones de hectáreas

USD: Dólares de Estados Unidos

CdUS: Cambio directo en el uso de suelo

## Introducción

La energía, a lo largo de la historia de la humanidad ha sido fundamental para la satisfacción de las necesidades de los humanos, tales como calefacción, cocción de alimentos, transporte, fuerza motriz [1]; incluso, en cuestiones de recreación, como ocurre en la actualidad. La energía se define como la capacidad de realizar trabajo [2,3], por tanto, la fuerza humana y animal fueron las primeras formas de energía que utilizó la humanidad, seguido del uso de la leña para el fuego.

La invención de la máquina de vapor, cuyo primer uso fue el bombeo de agua en minas de carbón mineral, permitió que éste fuera utilizado como fuente de energía sustituta de la leña con lo que dio inicio la revolución industrial, posicionando al carbón como la fuente de energía predominante, permitiendo el desarrollo de fábricas y modos de transporte (como el barco de vapor y el ferrocarril) [1]. El posterior descubrimiento de los usos energéticos del petróleo y el desarrollo del motor de combustión interna, significaron una sustitución de carbón como fuente de energía [1,4], sobre todo para los medios de transporte, desde entonces el petróleo se convirtió en la principal fuente de energía en el mundo [1,5].

Con el propósito de entender la manera en la que el ser humano obtiene y utiliza la energía surgió el concepto de *sistema energético*, el cual se conoce como un sistema compuesto por subsistemas como la búsqueda y extracción de recursos de energía primaria, el desarrollo de dichos recursos, la refinación, conversión, transportación, almacenamiento, distribución y uso [1]; dicho de otra forma, el sistema energético es la manera en la que el ser humano obtiene, transforma, distribuye y utiliza la energía.

El actual sistema energético mundial tiene una fuerte dependencia de los combustibles fósiles [6] (petróleo, carbón y gas natural), ya que depende de ellos en más de un 70% para el suministro energético -pero que en algunos sectores de la economía la dependencia es mayor, como el caso del sector transporte donde más del 96% de su demanda energética proviene del petróleo-, con diversos efectos negativos como consecuencia. Entre ellos encontramos la seguridad energética, la cual a pesar de la dificultad para definir el término

debido a su transformación a lo largo del tiempo y a sus distintos enfoques [7], en el sentido más general implica cuestiones de disponibilidad (lo que involucra acceso al suministro energético al evitar el abastecimiento de países en guerra o con tensiones políticas, diversificación de las fuentes de energía, medidas para evitar accidentes, fallas técnicas o sabotaje), capacidad (en términos de contar con la infraestructura necesaria lo que implica también acceso a financiamiento) y asequibilidad (lo que implica evitar altos precios de la energía) [7].

Otro de los problemas asociados al uso de combustibles fósiles es el calentamiento global. Como producto de la combustión de los combustibles fósiles se liberan Gases de Efecto Invernadero (GEI), siendo los más importantes el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [8]. Se les llama gases de efecto invernadero porque contribuyen a crear un efecto de retención del calor radiado por la Tierra, tal y como sucede en un invernadero. En principio la Tierra recibe la radiación solar en un rango amplio de longitudes de onda (desde el UV, visible e infrarrojo), que a su vez es absorbida por los continentes y los mares, ocasionando que se calienten. A su vez, de manera simultánea, la Tierra re-emite este calor pero a una longitud de onda mayor a la que fue absorbida (en el rango del infrarrojo). Los gases de efecto invernadero son capaces de absorber esta radiación infrarroja re-emitida, lo que ocasiona que el calor no sea emitido hacia el exterior de la atmósfera y que éste quede atrapado en la Tierra. Naturalmente existe en la Tierra un equilibrio entre el calor que se absorbe y el que se re-emite ya que esto es lo que permite que se den las condiciones de temperatura necesarias para la vida, sin embargo, cada vez hay mayores evidencias de que el aumento en las concentraciones de GEI está aumentando la temperatura de la superficie de la Tierra. Se espera que como consecuencia de este aumento medio de la temperatura se incremente la frecuencia y la intensidad de eventos climáticos extremos como las sequías y las tormentas, con los consecuentes efectos negativos en los ecosistemas, la agricultura y el bienestar humano [8].

El uso de combustibles fósiles tiene además otros efectos adversos en el ambiente, como los daños ocasionados por los derrames de petróleo durante su extracción, transporte o refinación; y las emisiones contaminantes que se producen durante la combustión de gas



natural, carbón y derivados del petróleo, ya que se liberan emisiones de NOx, Dióxido de Azufre, y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), los cuales causan la formación de smog y/o lluvia acida, con sus consecuentes impactos en la salud humana y en los ecosistemas [9].

Por otra parte, se ha reconocido que la energía es esencial para el desarrollo sustentable y para la lucha contra la pobreza. La energía afecta a todos los aspectos del desarrollo, incluyendo los sociales, económicos y ambientales, ya que es fundamental para el acceso al agua potable, la producción agrícola, acceso a los servicios de salud, transporte de personas, productos y servicios, así como para la educación [10-12].

En este sentido, el concepto de desarrollo sustentable cobró una importancia fundamental a partir de informe para las Naciones Unidas llamado “Nuestro Futuro Común”, mejor conocido como el Informe Brundtland, y va encaminado a lograr en los países el cuidado del medio ambiente y mejorar las condiciones de vida de las poblaciones a la par de llevar un desarrollo económico [13]. La definición de desarrollo sustentable que aparece en el Informe Brundtland: *Es aquél que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.* En general, el concepto de desarrollo sustentable es el proceso de redefinir el progreso humano, con un desdoblamiento de las potencialidades que requieren de la satisfacción de necesidades materiales y no materiales [14].

Por su parte, el concepto de sustentabilidad es dinámico, se ha definido como *una característica de los sistemas dinámicos para mantenerse a sí mismos a través del tiempo, sin un punto final fijo que pueda ser definido* [15].

Reconociendo que la energía es esencial para el desarrollo social y económico, los cuales son componentes claves para satisfacer las necesidades materiales de la humanidad y reducir las desigualdades socio-económicas, el logro de la sustentabilidad energética, se ha reconocido como un aspecto crítico para lograr un desarrollo sustentable [16]. La sustentabilidad energética se ha definido como el conjunto de prácticas, políticas y tecnologías que permiten el suministro de energía que las sociedades demandan, a los

menores costos sociales, ambientales y financieros [1]. Para este fin, es necesario lograr la modificación del sistema energético de manera que se superen los problemas propios del actual. La diversificación de las fuentes de energía, el mejoramiento de la eficiencia energética, la mitigación de emisiones GEI y otros contaminantes, son algunas de las características que debe tener un sistema energético para lograr la sustentabilidad [10, 11].

A este respecto, se ha reconocido a las fuentes de energía renovable como fuentes de energía que pueden cumplir con estas características. Las energías renovables, definidas ampliamente como aquéllas cuya tasa de regeneración es mayor a su tasa de consumo [17], son: eólica, oceánica, hidráulica, solar, bioenergía y geotérmica.

La bioenergía, es toda aquella energía final o útil que se obtiene a partir de la materia viva o materia orgánica producida por los seres vivos, conocida como biomasa [18,19]. La bioenergía tiene amplias perspectivas de desarrollo debido a que presenta ventajas como una fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles y a otras energías renovables: a) la biomasa puede ser almacenada, lo que da certidumbre en su suministro; b) puede ser transformada para aumentar su densidad energética y facilitar su manejo; c) puede ser producida y utilizada local o regionalmente, evitando la necesidad de utilizar transporte de largas distancias. También se le asocian ventajas ambientales como la mitigación de emisiones de GEI, ya que el CO<sub>2</sub> que emite la biomasa al quemarse es el mismo que se absorbió durante su crecimiento mediante la fotosíntesis. El uso de la bioenergía también puede generar beneficios sociales y económicos, como la diversificación de las economías rurales y oportunidades de empleo a lo largo de la cadena de producción [20].

Una de las formas de la bioenergía que se puede utilizar para modificar el sistema energético –en particular en el sector transporte– es el etanol [21], el cual es un alcohol producido por la fermentación y destilación de materias primas que contienen azúcares o almidón y que se utiliza como combustible en los vehículos de ignición por chispa [21]. La cantidad de etanol en mezclas con gasolina puede variar desde el 5% del volumen hasta el 100% que puede utilizarse directamente en automóviles Flex-fuel. En algunos países las mezclas más comunes con gasolina, el etanol se añade en una proporción del 5% al 10% en

volumen; en Brasil la mezcla llega a ser hasta el 26% de etanol anhidro (deshidratado) y 74% de gasolina, ésta mezcla puede utilizarse en todo tipo de automóviles con motor a gasolina.

Dependiendo de la materia prima utilizada en la producción, el etanol se clasifica como de primera y de segunda generación [22]. El etanol de primera generación es aquél que se obtiene de cultivos, algunos de ellos ricos en azúcares como la caña de azúcar o el sorgo dulce, y también se obtiene de cultivos ricos en almidones como el maíz y el trigo. Por otro lado, el etanol de segunda generación es aquél que utiliza materiales lignocelulósicos (materiales compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina) como materia prima, como la paja, los residuos agrícolas, la madera, bagazo de caña, entre otros [22]. La tecnología para la producción de etanol de segunda generación aún no es competitiva en términos económicos, por lo que hasta el momento no existe producción comercial [19].

El etanol y las otras fuentes de energía renovable también pueden tener impactos negativos [19]. En particular, se ha alertado sobre los efectos que la producción de etanol (y de biodiesel también) pueden tener sobre el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a emisiones por el cambio en el uso de suelo, dichas emisiones pueden contribuir al cambio climático el cual como ya se ha mencionado, puede tener efectos como el aumento del nivel medio del mar, derretimiento de los glaciares, intensificación de fenómenos meteorológicos extremos como lluvias torrenciales y sequías, entre otros [8]; los relacionados a la pérdida de biodiversidad debido al incremento de la deforestación; y los impactos debidos al uso de monocultivos que pueden amenazar la seguridad alimentaria al competir por tierras para la producción de alimentos, y que además, pueden ser causantes de erosión de suelo y de agotamiento de recursos acuíferos [18, 19]. El etanol se ha cuestionado ampliamente en cuanto a la mitigación de GEI y como sustituto de energía fósil. Se han llevado a cabo varios estudios de emisiones GEI y de balances energéticos con enfoque de ciclo de vida. El balance o rendimiento energético reporta la relación entre la energía fósil empleada para la producción de etanol y la energía renovable contenida en el etanol. Los resultados de emisiones GEI y balance energético son muy variados, inclusive en ocasiones contradictorios entre sí [24-32]. La explicación de la variedad de resultados se encuentra en

que los estudios presentan diferentes consideraciones metodológicas en el análisis del ciclo de vida como: diferentes límites del sistema, distintos niveles de aplicación de fertilizantes, factores de emisión, consideración o no de co-productos, y diversos métodos de asignación de emisiones a co-productos, entre las principales diferencias.

Debido a la alta dependencia del sector transporte mexicano de las gasolinas, y a que actualmente se importa el 41% de las gasolinas que se consumen en el país, en años recientes se ha reavivado el debate en México sobre la conveniencia del uso de etanol en el sector transporte –desde los años 80’s existió una iniciativa del IMP para utilizar el etanol como sustituto del tetraetilo de plomo como mejorador del octanaje en las gasolinas [33]. Con los objetivos de reducir las emisiones de GEI, diversificar las fuentes energéticas y aprovechar los posibles beneficios económicos ligados a la producción del etanol como la generación de empleos en el campo y en la industria, en el año 2008 se aprobó en México la Ley para la Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos [34], en donde se considera el uso de etanol proveniente de cultivos como oxigenante en los vehículos automotores a gasolina que circulan en el país, instrumentado a través del Programa de Introducción de Bioenergéticos y de un Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos. El primero tiene programado mezclar etanol con gasolina en un 6% de volumen en las tres principales zonas metropolitanas del país, iniciando en 2011 por la zona metropolitana de Guadalajara (aunque hasta octubre del 2011 aún no se implementaba esta mezcla) [35]. El Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos considera la producción sustentable de la materia prima (sin afectar al medio ambiente, la seguridad alimentaria, diversificando las fuentes de ingreso de los productores del campo y mejorando la competitividad económica) necesaria para satisfacer las metas del Programa de Introducción de Bioenergéticos [35]

Es importante entonces analizar la manera en que se producen los biocombustibles de primera generación, a fin de entender los aspectos que afectan su sustentabilidad, y así poder delinear su verdadero potencial para contribuir a la transformación del sistema energético a uno más sustentable.

Con el propósito de partir de un marco con el cual analizar la sustentabilidad de la producción de etanol, se identifican en la literatura tres trabajos importantes que proponen de manera general un marco para la evaluación y análisis de la sustentabilidad de la bioenergía [36-38].

En términos generales, los tres marcos consideran que la sustentabilidad debe ser evaluada considerando los aspectos ambientales, económicos y sociales de las opciones de bioenergía. De igual forma, los tres marcos presentan dos etapas muy marcadas en el proceso de evaluación, la primera de ellas implica una definición de criterios de sustentabilidad y sus respectivos indicadores; en tanto que en la segunda etapa involucra aspectos de integración de los indicadores, donde pueden utilizarse los índices de sustentabilidad, los llamados métodos multicriterio [36,37] o bien empleando lógica difusa [38]. Estas mismas consideraciones en cuanto a las dimensiones de la sustentabilidad y etapas del proceso se pueden observar en evaluaciones de sustentabilidad de biocombustibles [39] y tecnologías energéticas [40,41].

Detallando un poco más cada etapa del proceso de evaluación de sustentabilidad de la bioenergía, en principio los marcos señalan la necesidad de considerar las dimensiones social, ambiental y social [36], para lo cual es necesario aproximaciones integrales que modelen en conjunto estas dimensiones, a la vez de considerar todos los componentes del sistema de producción (producción de la materia prima, tecnología de conversión, transporte) [37].

Como ya hemos señalado, la definición de sustentabilidad energética implica aspectos ambientales, sociales y económicos, por lo que es necesario abordar el análisis de la sustentabilidad de opciones de bioenergía (donde se incluye al etanol) considerando estas tres dimensiones, de hecho, Masera et al. [42] señala que abordar una sola de las dimensiones de la sustentabilidad no puede ser descrito como una. De esta manera, los marcos de evaluación de sustentabilidad de la bioenergía son consistentes en cuanto a las dimensiones de sustentabilidad de evaluaciones en otros campos como en el manejo de recursos naturales [42].

La segunda necesidad señala considerar todos los componentes del sistema, para lo cual el concepto de ciclo de vida toma importancia. A este respecto Klöpffer [16] destaca que cualquier método de evaluación de los aspectos ambientales, sociales y económicos para la evaluación de sustentabilidad, deben tomar en cuenta todo su ciclo de vida, es decir, desde la extracción de la materia prima, la producción, el uso y reciclado, y la disposición de los desechos [16].

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se convirtió en una práctica estandarizada por la Organización Internacional de Estándares (ISO por sus siglas en inglés) a mediados de los 1990's. La metodología genérica de realización de ACV (según Norma ISO 14040 y 14041), abarca: definición del alcance del estudio y de la unidad funcional (la unidad con la cual se va a evaluar el desempeño del sistema estudiado), realización de inventario (de entradas y salidas al sistema de materiales, energía y emisiones), definición de los impactos ambientales, evaluación de los mismos y representación de resultados para el análisis posterior y la obtención de conclusiones. Hasta ahora el ACV como tal se limita a los impactos ambientales, donde no se consideran los impactos sociales y económicos; sin embargo, se han realizado varios intentos para integrar estas dimensiones a los ACV, de manera que los ACV, por sí mismos, puedan ser utilizados como herramientas para evaluaciones de sustentabilidad [16].

La idea fundamental dentro del ACV, consiste en realizar una aproximación de sistemas, ya que, en palabras de Klöpffer [16], *no tiene sentido mejorar una parte del sistema, en un paso del ciclo de vida, si este "mejoramiento" tiene consecuencias negativas para otras partes del sistema.*

Una vez establecidas las dimensiones de la sustentabilidad e identificados los componentes del sistema en el ciclo de vida de las alternativas bioenergéticas, el siguiente paso en los marcos de evaluación de la bioenergía es la definición de criterios de sustentabilidad y sus respectivos indicadores.

Los criterios son atributos generales de sustentabilidad, y representan un nivel de análisis más general que los indicadores. Los indicadores de sustentabilidad representan los parámetros de medición para la comparación entre diferentes estados o estructura de un sistema [1]. Los indicadores son importantes para hacer operativos los atributos o criterios de sustentabilidad que se puedan medir localmente, es decir, son herramientas útiles para reducir la complejidad de la descripción de un sistema [43]. Astier et al. [43] señala que los indicadores dependen entre otras cosas de las características del problema bajo estudio, de la escala del proyecto y de la disponibilidad de datos.

Los marcos de evaluación de sustentabilidad señalan que para la definición de los criterios de sustentabilidad es necesario capturar los atributos de sustentabilidad involucrando los intereses de todas las partes interesadas (stakeholders) [36], como pueden ser productores de biomasa, procesadores industriales, transportistas, etc.

En este sentido, se han desarrollado criterios e indicadores de sustentabilidad para diferenciar biocombustibles sustentables de los que no lo son, propuestos en el contexto de esquemas de certificación [44]. En general, las propuestas de estándares de certificación incluyen sobre todo criterios ambientales: requerimientos como el balance de GEI, protección de la biodiversidad, conservación de suelo y agua, y calidad del aire; también se pueden encontrar criterios socio-económicos como contribución al bienestar de los trabajadores y de la población local, así como el logro de la rentabilidad económica [44].

Una vez definidos los criterios e indicadores de sustentabilidad que reflejan las condiciones del sistema de bioenergía para lograr la sustentabilidad, y que estos a su vez consideran los intereses de todas las partes involucradas, el siguiente paso es la integración de los indicadores.

La gran variedad de indicadores para la evaluación de sustentabilidad de un sistema representan un problema para los hacedores de políticas, ya que estos demandan información agregada [45], o dicho de otra forma, es necesario integrar los resultados de los diferentes indicadores de manera que ayuden a evaluar entre alternativas con diferentes

tipos de consecuencias sobre la sociedad y el ambiente. Esta integración permite realizar una calificación de las alternativas analizadas.

Esto implica buscar un procedimiento de presentación de resultados en el cual queden explícitos los problemas y beneficios de cada sistema o alternativa, lo cual no es fácil debido a que la información contenida en los indicadores es muy variada, por lo que se ha llegado a reconocer que “la integración de resultados en el análisis de sustentabilidad es actualmente un área abierta de investigación, por lo que no existe un consenso o un método claramente preferido” [42].

Se identifican al menos dos enfoques para la presentación e integración de resultados: las técnicas cuantitativas y cualitativas [42].

Entre las técnicas cuantitativas encontramos la elaboración de índices de sustentabilidad. En términos generales el procedimiento consiste en construir índices para cada grupo de indicadores, estos índices se obtienen normalizando los datos según que tanto cumplen con el objetivo deseado. Posteriormente estos índices se agregan de tal forma que cada sistema pueda caracterizarse por un valor numérico único. Los índices se pueden agregar mediante promedios simples o ponderados. Como resultado del proceso, cada sistema tiene un índice numérico de sustentabilidad que permite compararlo con los otros sistemas analizados [42]. Entre las desventajas del uso de los índices encontramos que en su construcción suelen requerir de decisiones arbitrarias en la elección de las variables, parámetros y los métodos de agregación necesarios para medir el desempeño de un sistema (subjetividad en la evaluación) [43]. Otra desventaja de los índices es que pueden quedar ocultos los elementos más importantes que determinan la sustentabilidad del sistema estudiado [43].

Entre las técnicas cuantitativas también se encuentran los llamados análisis multicriterio para la toma de decisiones, los cuales son propuestos por dos marcos de evaluación de sustentabilidad de la bioenergía [36,37]. En estos modelos los indicadores pueden ser numéricos o valorarse de acuerdo a una escala ordinal (ejemplo: alto, medio, bajo). Las diferentes alternativas pueden analizarse posteriormente mediante matrices de decisión, por medio de índices de concordancia y discordancia y otras técnicas [42]. En cuanto a la



aplicación de los métodos multicriterio para la toma de decisiones en los sistemas energéticos encontramos el trabajo de Afgan y Begic en donde se evalúa la sustentabilidad de varias opciones para la generación de energía eléctrica en Bosnia para encontrar las tecnologías y la capacidad más adecuadas para ese país [46]. También se encuentra una tesis realizada en el CIE en donde se utiliza el Método Multicriterio, Proceso Analítico de Jerarquización (AHP por sus siglas en inglés) para la evaluación de sustentabilidad de plantas generadoras de electricidad [47].

Por otra parte, las técnicas cualitativas tienen como objetivo integrar los resultados de la evaluación de una manera sencilla y clara. En casos como los análisis de sustentabilidad en los que se utiliza un gran número de indicadores, las técnicas cualitativas permiten visualizar conjuntamente el resultado de los diferentes indicadores seleccionados. Masera et al. [42] mencionan algunos ejemplos que se utilizan en el manejo de recursos naturales, mas estas técnicas cualitativas no son muy comunes en la evaluación de sustentabilidad de sistemas energéticos.

Al final del proceso de integración, se ha reconocido la importancia de llevar a cabo análisis de sensibilidad [37], ya que no importando que método de integración utilizemos al final habrá algunos indicadores (y por lo tanto criterios) que tendrán asignado un mayor peso que otros. El análisis de sensibilidad permite conocer cómo cambia la calificación de cada alternativa al considerar diferentes ponderaciones de los indicadores.

Basado en los marcos para la evaluación de la bioenergía se pueden identificar los pasos necesarios para la evaluación de la sustentabilidad de la producción de bioenergía: 1) definición del problema; 2) generar una lista de alternativas o sistemas a analizar; 3) especificar un conjunto de criterios e indicadores de sustentabilidad a evaluar (considerando las dimensiones ambiental, económica y social, además de emplear un enfoque de ciclo de vida); 4) evaluar los indicadores; 5) realizar la integración de los indicadores; 6) hacer análisis de sensibilidad.

Si bien hasta el momento no ha habido trabajos que evalúen la sustentabilidad de la producción de etanol bajo alguno de los marcos conceptuales mencionados, sí se han

realizado evaluaciones de la sustentabilidad de la producción de etanol. Existen algunos trabajos realizados para evaluar la sustentabilidad de la producción de etanol de caña de azúcar en Brasil. El primero de ellos [48] propone un conjunto de 17 criterios de sustentabilidad con el objetivo de identificar los cuellos de botella que podrían presentarse para lograr la certificación de la producción de etanol de caña, basado en el sistema propuesto en Holanda [48]. El trabajo discute la dificultad de establecer indicadores cuantitativos para todos los criterios, en particular para la evaluación de biodiversidad, seguridad alimentaria, organismos genéticamente modificados (OGM). De igual forma se discute la dificultad de encontrar toda la información necesaria para poder evaluar los indicadores. Los indicadores que tienen una mayor factibilidad de ser aplicados fueron los de emisiones GEI y de balance energético, ambos calculados a partir de un Análisis del Ciclo de Vida, aunque el caso de las emisiones por el cambio en el uso indirecto en el uso de suelo no es posible aún establecer una metodología acordada que cuantifique de manera confiable estas emisiones. Las desventajas principales del método propuesto para aplicarlo a otros casos son, la dificultad de aplicar el análisis de forma completa (no hay indicadores para todos los criterios), la carencia de información suficiente para evaluar todos los indicadores, y la dificultad para identificar posibles interacciones entre los diferentes criterios de sustentabilidad.

Otros dos trabajos [21, 49] tienen la intención de demostrar la sustentabilidad a nivel regional de la producción de etanol en Brasil. A partir de datos de mitigación de gases GEI, balance energético (ambos en el ciclo de vida), cambio en el uso de suelo, emisiones contaminantes, uso de agua, aspectos socio-económicos como la creación de empleos y la rentabilidad económica, Goldemberg [21] realiza una revisión bibliográfica para señalar las ventajas de la producción de etanol de caña de azúcar y como esta producción no ha tenido efectos adversos en cada uno de los aspectos ambientales y socioeconómicos analizados, por lo que concluye que la producción de etanol en Brasil es sustentable. En este mismo sentido encontramos la evaluación de Walter et al. [49], aunque en su evaluación hace una exploración mayor sobre el cambio en el uso de suelo (donde demuestra que la pérdida del

Cerrado Brasileño se debe principalmente a la expansión del cultivo de Soya), además de evaluar emisiones de GEI y criterios socio-económicos.

Por su parte Pereira y Ortega [50] evalúan la sustentabilidad de la producción de etanol en Brasil considerando emisiones de GEI, balance energético, demanda de tierra, agua y algunos materiales. El estudio no toma en cuenta aspectos socio-económicos por lo que de acuerdo a nuestros marcos no podría considerarse como una evaluación de sustentabilidad, además la metodología no contiene una integración de los indicadores que permita calificar entre diferentes opciones de producción.

Existen en la literatura otros tipos de estudios que a pesar de no ser evaluaciones de sustentabilidad evalúan aspectos ambientales, económicos y sociales. Entre estos estudios tenemos el de Chávez-Rodríguez y Nebra [51] donde analizan emisiones GEI, huella ecológica y uso de agua para la producción de etanol de caña de azúcar en Brasil, etanol de maíz en Estados Unidos y gasolina. El estudio realiza una comparación de cada uno de los aspectos entre sí, pero no integra las evaluaciones para lograr una calificación. Los resultados muestran un mejor desempeño en dos de los tres evaluados para el caso de la caña de azúcar en Brasil.

Por su parte el estudio de Luo et al. [52] evalúa en el ciclo de vida las emisiones de GEI y el costo de producción aplicado al caso del etanol de caña de azúcar en Brasil, y lo comparan con la gasolina. Debido a que sólo se valúan dos indicadores no es necesario establecer una metodología para integrarlos y poder calificar entre opciones, sin embargo el uso del ciclo de vida para el cálculo en los costos de producción, con el llamado *Life Cycle Costing*, es novedoso.

Otro de los estudios revisados [53] evalúa el balance energético, emisiones contaminantes del aire y la rentabilidad económica aplicados a la producción de etanol de maíz, trigo y yuca en China. El estudio compara cada indicador entre sí para las diferentes opciones y concluye que la mejor materia prima es la yuca, sin embargo se encontraron algunos trade-offs (intercambios de recursos) que hacen que no sea tan claro este resultado. La conclusión

no requirió de una integración de indicadores porque solamente son tres, sin embargo una mayor inclusión de indicadores pudiera haber hecho difícil la identificación de la mejor opción sin una integración de los indicadores.

En los estudios referenciados sobre la evaluación de algunos aspectos de la sustentabilidad de la producción de etanol, se observan algunas tendencias que nos apuntan a las características que debe tener la producción de etanol para ser sustentable. Entre estas podemos mencionar a la mitigación de GEI, donde se ha mencionado que un factor fundamental radica en no establecer los cultivos en áreas con un alto contenido de carbono como es el caso del *Cerrado Brasileño* [49], y también se remarca la importancia que tienen aquellos casos en donde se obtiene un buen rendimiento agrícola sin necesidad de utilizar una gran cantidad de insumos, como es el caso de los fertilizantes, ya que éstos tienden a tener una mayor emisión de GEI [49,51]. También podemos mencionar el uso de co-productos, ya que si éstos son aprovechados se logra una mayor reducción de las emisiones GEI y además su venta contribuye a mejorar el costo de producción del etanol [53].

Partiendo de las experiencia anteriores es importante señalar lo dicho por Buchholz et al. [37], quienes recalcan la importancia que en la evaluación de la sustentabilidad se simplifique la complejidad del sistema, utilizando un número restringido de criterios estructurados de tal forma que clarifiquen las relaciones impactos y salidas, donde la importancia radica en encontrar “un puñado de causas” que puedan explicar satisfactoriamente al sistema y que puedan ser utilizados para hacer al sistema más sustentable.

Basado en la idea de Buchholz et al., en esta tesis planteamos un análisis de sustentabilidad basado en los marcos conceptuales señalados y utilizando un número de criterios e indicadores reducidos que permiten identificar las partes del sistema que contribuyen en mayor medida a la sustentabilidad del sistema, en este caso, de las opciones para la producción de etanol en México.

Por lo anterior, la investigación presentada en esta tesis doctoral se guía con la siguiente hipótesis:

La producción de etanol de primera generación en México puede ser sustentable si: los cultivos se establecen en áreas con un bajo contenido de carbono (en biomasa aérea, subterránea y en el suelo); se utilizan plantas con alta eficiencia fotosintética, que se traduce en mayor productividad por unidad de área; se minimiza el uso de los fertilizantes químicos para su cultivo; se utiliza agua de lluvia en lugar de agua de riego; se utilizan los residuos para generar la energía demandada en el proceso industrial; se aprovechan los co-productos y se logra un estado intermedio entre la mecanización y el uso de mano de obra.

El objetivo principal de este trabajo es identificar las condiciones para la sustentabilidad de la producción de etanol de primera generación como una fuente de energía en México a partir de un análisis de sus aspectos ambientales, sociales y económicos, tanto favorables como desfavorables, y cómo se ven afectados por las materias primas empleadas y los métodos de producción. Otro de los objetivos es generar información para contribuir a la discusión en el tema, ya que las investigaciones y conocimientos sobre las implicaciones para la formulación de política pública nacional son escasos.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Identificación de las materias primas y tecnologías para la producción de etanol que tienen un mayor potencial de implementación para México.
- Análisis del ciclo de vida de vida de la producción de etanol a partir de las materias primas y tecnologías identificadas, con el propósito de cuantificar la mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como de identificar el rendimiento energético, expresado como la energía renovable obtenida en el etanol entre la energía fósil gastada para la producción del etanol, con el objetivo de determinar cuantitativamente si el etanol entrega más energía renovable que la energía fósil demanda.

- Cuantificar el volumen de agua demandado para la producción de etanol, de manera que sirva de base para una evaluación previa de los impactos en los recursos acuíferos debidos a una posible expansión de los cultivos para la producción de etanol.
- Cuantificar el área requerida para la producción de una unidad de biocombustible, lo que ayudará a identificar las modalidades de producción que hacen un menor uso de tierra;
- Evaluar el costo de producción de etanol en México para las diferentes materias primas y modalidades identificadas. Este análisis ayudará a delinear qué tan competitivo, en términos económicos, puede ser el etanol en comparación con la gasolina, además, ayudará a identificar dónde se encuentran las principales oportunidades de reducción de costos.
- Evaluar el potencial de creación de empleo de cada una de las modalidades identificadas, el cual se ha mencionado como uno de los beneficios sociales de la producción de etanol.
- Construcción de un índice integrado con el propósito de identificar, bajo cierta valoración, cuales son las modalidades de producción que tienen una mayor sustentabilidad.

La metodología utilizada en esta tesis incluye el uso de investigación bibliográfica para la identificación de materias primas y tecnologías prometedoras de producción de etanol de primera generación en México. Posteriormente se define un conjunto de seis indicadores basados en criterios de sustentabilidad ambientales, sociales y económicos, que han sido identificados como muy importantes (debido a su recurrencia en la revisión bibliográfica) para la sustentabilidad de la producción de etanol. Estos indicadores son:

1. Indicador ambiental ( $I_a$ ): evalúa las emisiones GEI en el ciclo de vida de la producción de etanol.
2. Indicador energético ( $I_e$ ): evalúa el rendimiento energético en el ciclo de vida de la producción de etanol.

3. Indicador consumo de agua ( $I_{ua}$ ): cuantifica el consumo de agua en el ciclo de vida de la producción de etanol.
4. Indicador uso de suelo ( $I_{us}$ ): cuantifica el área necesaria para la producción de una unidad energética de etanol.
5. Indicador económico ( $I_{ec}$ ): cuantifica el costo de producción de etanol manteniendo un enfoque de ciclo de vida.
6. Indicador social ( $I_s$ ) El indicador social consiste en cuantificar los empleos directos generados

La metodología continúa con la evaluación de cada indicador considerando un enfoque de ciclo de vida (con la excepción del indicador  $I_{us}$ , donde no se contó con la información suficiente para mantener el enfoque de ciclo de vida, pero que por su importancia se decidió mantenerlo y evaluarlo parcialmente). En esta parte se analizan además los factores determinantes en el desempeño de cada indicador, para determinar cuales son los aspectos que contribuyen al mejoramiento de la sustentabilidad en la producción de etanol.

Posteriormente se realiza una integración de los indicadores de sustentabilidad (previamente normalizados con valores de referencia encontrados en las mejores prácticas) por medio de la creación de un índice, en el cual se hace una ponderación de los indicadores basado en opiniones de expertos en el tema. Para evitar el problema de reduccionismo por la construcción del índice, se presentan también los resultados de los indicadores en forma de gráficas radiales. Finalmente se realizan análisis de sensibilidad del índice de sustentabilidad.

De la revisión bibliográfica sobre las materias primas más prometedoras para México, resulta que se encontraron tres materias primas con mayor potencial, la caña de azúcar, el sorgo grano y el maíz. Adicionalmente, existe también un alto potencial de producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos, sin embargo, los costos de producción con esta tecnología aún son altos y se espera que pasen todavía algunos años para que éstos sean competitivos.

Como al momento del inicio de esta investigación (Agosto 2007), no existía ningún trabajo publicado que reportara las emisiones en el ciclo de vida de la producción de etanol de primera generación. Esta fue la principal razón para enfocar el estudio en las materias primas para la producción de etanol de primera generación.

El contenido de la tesis está estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se revisan el concepto de sistema energético y de los problemas asociados a éste. Se introduce el estudio del etanol como una fuente de energía en el sector transporte y se revisa su potencial para contribuir como combustible alternativo.

En el capítulo 2 se presenta y desarrolla el marco teórico de la tesis centrada sobre la sustentabilidad del aprovechamiento de la bioenergía y se propone una metodología general para el análisis de la sustentabilidad de biocombustibles líquidos considerando un enfoque de ciclo de vida. Se incluye como parte de la metodología la identificación de materias primas, tecnologías prometedoras para la producción de etanol en México y sus modalidades de producción. Con el objetivo de medir la sustentabilidad de las modalidades identificadas se proponen indicadores de sustentabilidad y la forma de calcularlos y la definición de un índice general de sustentabilidad.

En el capítulo 3 se presentan los resultados de la investigación sobre las modalidades de producción de etanol en términos de los indicadores listados anteriormente, a partir de los cuales se calcula el índice general de sustentabilidad para cada modalidad de producción y se procede a su análisis.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para investigación futura.

En los anexos se presentan tres artículos derivados de esta investigación y datos para las metodologías específicas.



## Capítulo 1

### **La energía y el sistema energético**

En este capítulo se presentan los antecedentes generales del proyecto, los conceptos de energía, sistema energético, los problemas del sistema energético actual, la sustentabilidad energética y sus características y las energías renovables como alternativas para modificar el sistema energético a uno más sustentable.

#### **1.1 Historia**

El ser humano siempre ha buscado mejorar su calidad de vida al sustituir la fuerza humana por otras alternativas para realizar actividades o trabajos tales como mover objetos, transformar materias primas, o bien en transportarse a si mismo de un punto a otro. En la antigüedad se utilizaban los caballos como un medio de transporte o como un medio para ejercer fuerza mecánica, mientras que las corrientes de agua y el viento se utilizaron para molienda y como medios de propulsión para botes y otras embarcaciones. El uso de la leña para satisfacer las necesidades de calefacción y cocción de alimentos fue y ha sido muy importante en la historia, ya que en 1850 representaba el 95% del recurso energético [1].

La energía, a pesar de las discusiones en cuanto a su definición y la evolución del término [2,3], se define comúnmente como la capacidad de realizar trabajo, por tanto, la fuerza humana y animal fueron las primeras formas de energía que utilizó el hombre. La invención de la máquina de vapor y sus posteriores desarrollos permitieron que el carbón mineral<sup>1</sup> fuera utilizado como fuente de energía, es más, el primer uso de la máquina de vapor consistió en la extracción de agua de las minas de carbón inglesas. Con esta invención inició la revolución industrial posicionando al carbón como la fuente de energía predominante, participando con cerca del 50% del consumo de energía primaria mundial hacia 1925 [4], lo cual permitió el desarrollo de las fábricas y los vehículos (incluyendo los botes de vapor y las locomotoras). Posteriormente con el descubrimiento de los usos energéticos del petróleo, el carbón comenzó a ser sustituido, sobre todo para los medios de

---

<sup>1</sup> El carbón fue descubierto y usado por los chinos desde el año 1000 AC (y llevado a Europa por Marco Polo) [1]

transporte, gracias a la invención de los motores de combustión interna. Desde los sesentas del siglo pasado el petróleo se convirtió en la principal fuente de energía en el mundo.

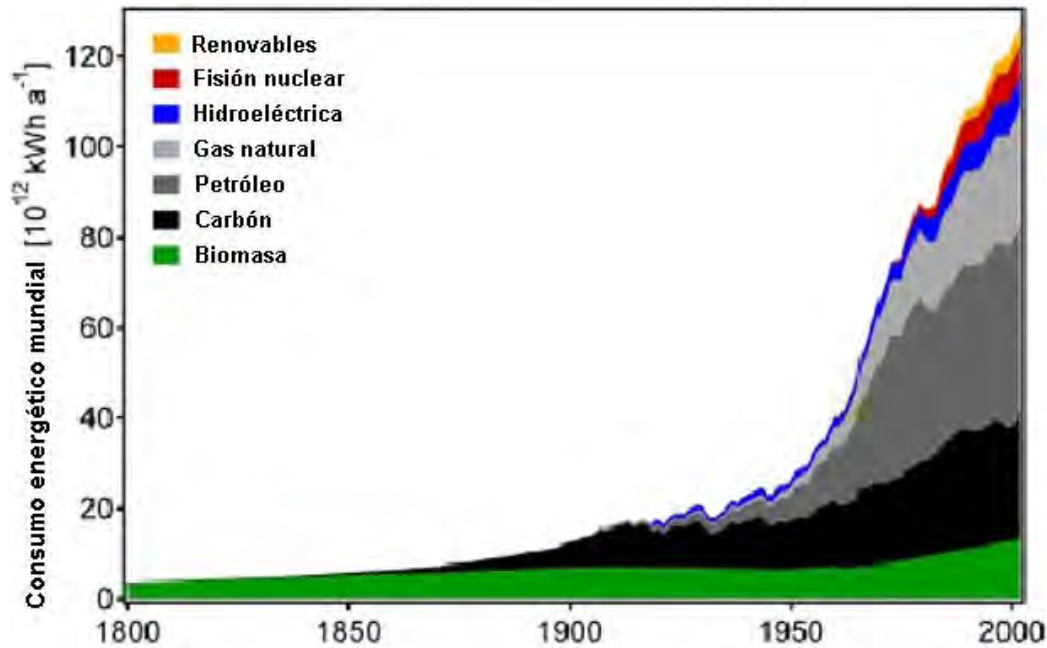


Figura 1.1 Evolución del consumo energético mundial desde 1800 hasta nuestros días [5].

## 1.2 Panorama mundial de la energía

En el año 2008 el consumo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) contabiliza la mayor proporción de los requerimientos mundiales de energía al sumar 475,160 PJ [6]. El petróleo constituye la principal fuente de energía entre estos combustibles fósiles, seguido del carbón y del gas natural (Figura 1.2). Las energías renovables contribuyen con el 13% del consumo mundial de energía primaria, donde la biomasa y los residuos representan el 10%, la hidroelectricidad el 2.3% y las otras energías renovables contribuyen con el 0.7%. La energía nuclear contribuye con poco menos de la mitad de la energía suministrada por las renovables 6%.

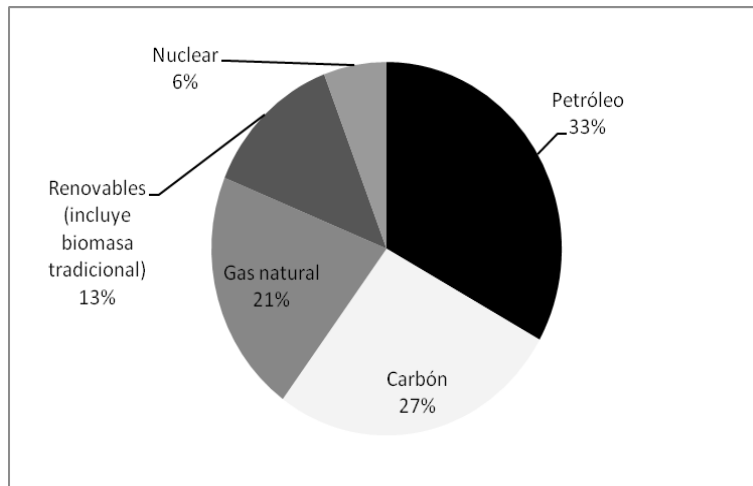


Figura 1.2 Consumo mundial de energía primaria en 2008; 475,160 PJ [6].

Actualmente de acuerdo a la EIA [6] los sectores que demandan la mayor cantidad de energía son el sector industrial con poco menos del 52%, seguido del sector transporte con una demanda del 27% de la energía. Los sectores residencial y comercial demandan el 14% y el 7% de la demanda mundial de energía respectivamente.

El aumento de la población que demanda bienes y servicios, así como el crecimiento económico son las dos principales fuerzas motrices del aumento de los requerimientos energéticos en el mundo. En un escenario tendencial realizado por la EIA [6] se estima que el consumo mundial de energía se incrementará en un 47% al año 2035, donde se espera que de no existir cambios sustanciales de participación de las energías renovables, el consumo de combustibles fósiles alcanzaría una participación del 71%. De esta manera, el escenario contempla un aumento en el uso de petróleo, gas y carbón, principalmente de éste último debido a su menor precio. En cuanto a la demanda futura de petróleo, el caso del sector transporte es de particular importancia, ya que se espera que los requerimientos energéticos de éste dependerá en un 96% del petróleo, por lo que las proyecciones señalan que la demanda de petróleo por el sector transporte crecerán en un 50% al año 2030, y en un 80% al año 2050 [54].

### 1.3 El sistema energético

Reconociendo el papel fundamental que juega la energía en la vida humana, es necesario entender la manera en que el ser humano obtiene y utiliza dicha energía. Para esto es importante definir lo que se conoce como sistema energético. El término “sistema energético” se usa para describir un sistema total compuesto por subsistemas como la búsqueda y extracción de recursos de energía primaria, el desarrollo de dichos recursos, la refinación, conversión, transportación, almacenamiento, distribución y uso, dicho de otra forma, el sistema energético es la manera en la que el ser humano obtiene, transforma, distribuye y utiliza la energía. [1]. En la figura 1.3 se muestra un esquema del sistema energético.

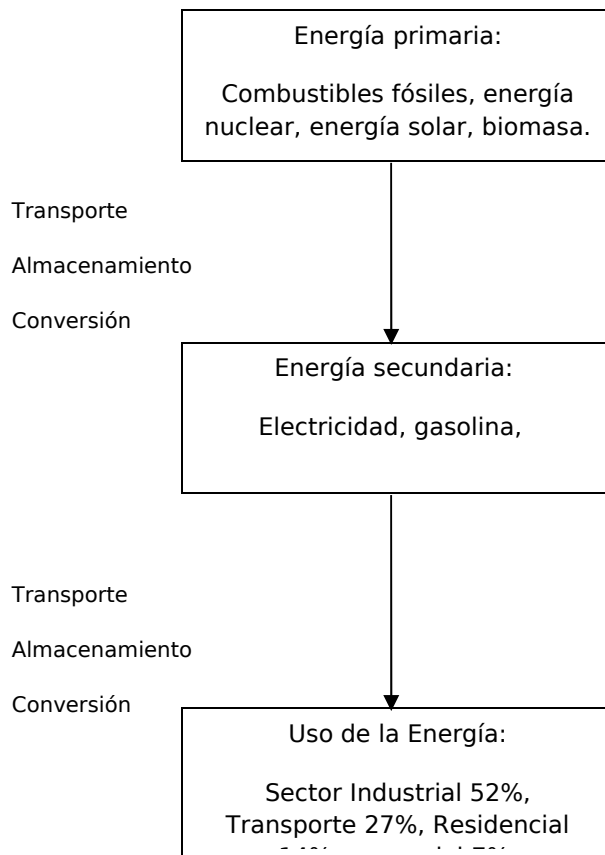


Figura 1.3 Esquema del sistema Energético. Basado en [1]

La energía primaria, que es la energía tal y como la encontramos en la naturaleza y que no ha sufrido ningún tipo de proceso de transformación, es transportada, almacenada (aunque no en todos los casos) y convertida en energía secundaria. La energía secundaria es el resultado de la transformación de la energía primaria que en muchos casos no puede ser usada directamente, y que requiere de un proceso de transformación para disponer de esta energía. Ejemplos son la electricidad y la gasolina. En México la mayor parte de la electricidad se obtiene de la combustión de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural o la biomasa, mientras que la gasolina se obtiene a partir de la refinación del petróleo. A su vez, la energía secundaria es transportada, almacenada y acondicionada en formas más convenientes para su uso. A las formas más convenientes de la energía nos referimos por ejemplo a las características que debe tener la gasolina (un alto octanaje) para poder ser usada adecuadamente.

### 1.3.1 Problemas del sistema energético mundial

El amplio uso de los combustibles fósiles en el sistema energético mundial para satisfacer la demanda mundial de energía, ha ocasionado diversos efectos negativos, relacionados con la falta de disponibilidad de recursos, garantizar una seguridad de abasto energético, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) principales causantes del calentamiento global, accidentes y amenazas para la paz mundial. Algunos de estos efectos negativos se discuten a continuación.

#### 1.3.1.1 Recursos finitos

El uso de los combustibles fósiles como principal fuente de energía en el mundo presenta problemas en cuanto a su disponibilidad futura, ya que los combustibles fósiles son recursos finitos. Si bien es muy difícil determinar la verdadera disponibilidad de combustibles fósiles, hay algunas estadísticas que nos dan alguna idea. En su reporte estadístico anual British Petroleum (BP) señala que las reservas probadas mundiales de petróleo convencional al año 2008 ascendieron a 1,258 miles de millones de barriles, con una producción de 81,820 millones de barriles diarios, lo que resulta en una razón Reservas entre Producción promedio mundial (R/P) de 42 años [55]. Para el caso del gas natural la

relación R/P es de 60.4 años, mientras que para el carbón su relación R/P es de 122 años. Si bien es posible que no exista en el corto plazo un desabasto de energéticos, el agotamiento de los recursos repercute en el precio de los energéticos, con desventajas para los países que no cuentan con fuentes de energía propias.

#### 1.3.1.2 Seguridad energética

La seguridad energética, la cual a pesar de la dificultad para definir el término debido a su transformación a lo largo del tiempo y a sus distintos enfoques [7], en el sentido más general implica cuestiones de disponibilidad (lo que involucra acceso al suministro energético al evitar el abastecimiento de países en guerra o con tensiones políticas, diversificación de las fuentes de energía, medidas para evitar accidentes, fallas técnicas o sabotaje), capacidad (en términos de contar con la infraestructura necesaria lo que implica también acceso a financiamiento) y asequibilidad (lo que implica evitar altos precios de la energía) [7].

#### 1.3.1.3 Disparidad en el uso de la energía y pobreza

Es reconocido que el acceso a la energía se relaciona con la calidad de vida que se puede alcanzar. En 1950 los países industrializados consumieron el 93% de la energía mundial, aunque posteriores desarrollos económicos en Asia y Latino América redujeron este porcentaje [56]. En promedio una persona de los países en desarrollo consume anualmente el equivalente a seis barriles de petróleo, mientras que una persona promedio en un país desarrollado consume casi 40 barriles [9], sin embargo, las diferencias de consumo entre los países más pobres y los más ricos pueden llegar a casi 60 veces.

Una medida del bienestar que alcanzan los habitantes de un país es el Índice de Desarrollo Humano (HDI por sus siglas en inglés), que relaciona y que muestra una estrecha correlación con el consumo de energía. Las llamadas metas del milenio de la ONU (MDG<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Los Objetivos de Desarrollo del Milenio, son ocho objetivos de desarrollo humano (1. Erradicar la pobreza extrema y el hambre. 2. Educación universal. 3. Igualdad entre los géneros. 4. Reducir la mortalidad de los niños. 5. Mejorar la salud materna. 6. Combatir el VIH/SIDA. 7. Sostenibilidad del medio ambiente. 8. Fomentar una asociación mundial, que los países miembros de las Naciones Unidas acordaron conseguir para el año 2015.

por sus siglas en inglés) reconocen esta relación y señalan que la energía es esencial para el desarrollo y para la lucha contra la pobreza. Afecta a todos los aspectos del desarrollo - sociales, económicos y ambientales- incluyendo medios de subsistencia, acceso al agua potable, productividad agrícola, salud, educación, y asuntos relacionados con el género. Ninguna de los MDG se pueden cumplir sin una mejora importante en la calidad y cantidad de los servicios de energía de los países en desarrollo. Los esfuerzos del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD por sus siglas en inglés) tiene un componente fundamental en lograr el acceso a la energía, especialmente la meta 1, reducir a la mitad la proporción de personas que viven en pobreza extrema para el año 2015.

#### 1.3.1.4 El calentamiento global

A nivel global el uso de combustibles fósiles como fuente principal de energía ha ocasionado un aumento en la atmósfera de la concentración de CO<sub>2</sub> y otros gases conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI)<sup>3</sup>. Se les llama gases de efecto invernadero porque contribuyen a crear un efecto de retención del calor radiado por la Tierra, tal y como sucede en un invernadero. En un principio la Tierra recibe la radiación solar en un rango amplio de longitudes de onda (desde el UV, visible e infrarrojo), que a su vez es absorbida por los continentes y los mares, ocasionando que se calienten. A su vez de manera simultánea la Tierra re-emite este calor pero a una longitud de onda mayor a la que fue absorbida (en el rango del infrarrojo). Los gases de efecto invernadero son capaces de absorber la radiación infrarroja, lo que ocasiona que el calor no sea re-emitado hacia el exterior de la atmósfera y que este quede atrapado en la Tierra. Naturalmente existe en la Tierra un equilibrio entre el calor que se absorbe y el que se re-emite ya que esto es lo que permite que se den las condiciones de temperatura necesarias para la vida, sin embargo, cada vez hay mayores evidencias de que el aumento en las concentraciones de GEI, está aumentando la temperatura de la superficie de la tierra (figura 1.4). Además de este aumento de la

---

<sup>3</sup> En los GEI podemos encontrar el metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y los Clorofluorocarbonos.

temperatura se espera un aumento en el nivel del mar a escala mundial, debido al derretimiento de la cubierta de nieve en la región septentrional del globo terrestre.

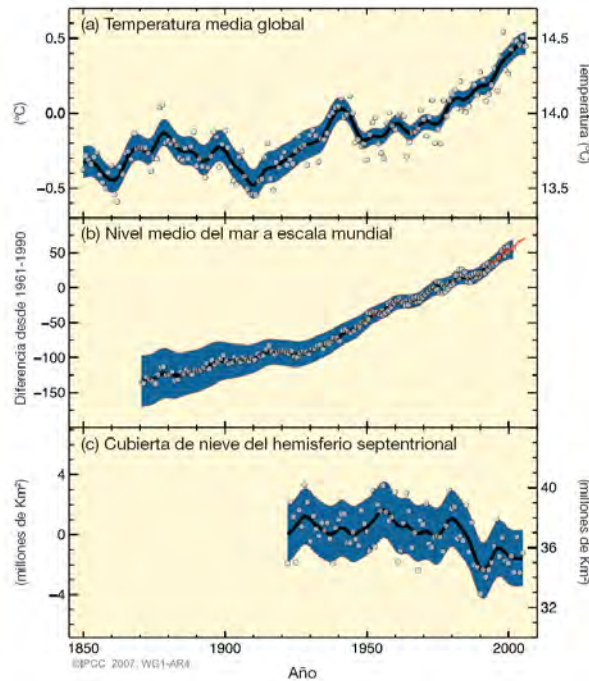


Figura 1.4 Incrementos de la temperatura media global, del nivel medio del mar y decremento de la cubierta de nieve del hemisferio septentrional [8].

Aunado a esto se espera también que se intensifique la frecuencia de eventos climáticos extremos como las sequías y las tormentas, con los consecuentes efectos negativos en los ecosistemas, la agricultura y el bienestar humano.

#### 1.3.1.5 Otros aspectos ambientales

El uso de combustibles fósiles tiene además otros efectos negativos, entre ellos se incluye el daño a la vida salvaje debido a las técnicas sísmicas de exploración y a la construcción de caminos, las fugas de materiales tóxicos como el cadmio, el mercurio, el arsénico, los cuales pueden dañar el ambiente local. En el caso del petróleo también encontramos que pueden ocurrir derrames durante la extracción, el transporte o la refinación, un ejemplo de esto tuvo lugar en abril del 2010 cuando ocurrió un derrame masivo de crudo debido a una



explosión en la plataforma Deepwater Horizon en el Golfo de México. Se calcula que el derrame alcanzó los 4.9 millones de barriles y ocasionó enormes impactos en la biodiversidad marina y pérdidas en las actividades económicas de habitantes de las costas de Estados Unidos [57]. Por otra parte, la combustión de carbón y petróleo (principalmente en los vehículos) causan emisiones de NOx, Dióxido de Azufre, y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), los cuales causan la formación de smog, lluvia ácida, con sus consecuentes efectos negativos en la salud humana y en los ecosistemas.

#### **1.4 La sustentabilidad energética**

A partir de la publicación del informe para las Naciones Unidas llamado Nuestro Futuro Común, mejor conocido como el Informe Brundtland [13], el tema del Desarrollo Sustentable y de la Sustentabilidad ha cobrado una importancia fundamental para lograr en los países un mejor cuidado del medio ambiente y mejorar las condiciones de vida de las poblaciones a la par de llevar un desarrollo económico.

La definición más común de Desarrollo Sustentable es la que aparece en el Informe Brundtland: *Es Aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.*

El desarrollo sustentable, como es entendido por Gallopin, y que adoptamos en este trabajo, es el proceso de redefinir el progreso humano, que no necesariamente significa un crecimiento cuantitativo, sino que puede significar un desdoblamiento cualitativo o de potencialidades, por lo que requiere de satisfacer necesidades materiales y no materiales [14].

Por su parte, Astier et al [43] han reconocido que el concepto de sustentabilidad no tiene una definición única, ya que existe una multiplicidad de perspectivas válidas para su definición y análisis [43]. Entre estas perspectivas se identifican principalmente tres, 1) la sustentabilidad del sistema humano (sustentabilidad débil); 2) la sustentabilidad del sistema ecológico (sustentabilidad fuerte); y 3) la sustentabilidad del sistema socio-ecológico, que reconoce las interrelaciones entre sociedad y naturaleza, lo que implica que el concepto de

sustentabilidad tiene un carácter multidimensional, entre aspectos ambientales, económicos y sociales.

El concepto de sustentabilidad además es dinámico, y se ha definido como *una característica de los sistemas dinámicos para mantenerse a sí mismos a través del tiempo, sin un punto final fijo que pueda ser definido* [15]. Esta definición es la adoptada en nuestro trabajo.

De acuerdo a lo arriba señalado, en este trabajo entendemos que la sustentabilidad de los sistemas<sup>4</sup> (en este caso y como se verá, del sistema energético con una aplicación para el sector transporte) contribuye a lograr el desarrollo sustentable.

Por otra parte, con el propósito de poner en práctica el concepto de sustentabilidad (lo que se conoce como hacer operativo el concepto), se han establecido una serie de atributos generales que deben guardar los sistemas para ser sustentables, entre los que se encuentran [43]: resiliencia, confiabilidad, productividad, adaptabilidad, equidad.

Reconociendo que la energía es esencial para el desarrollo social y económico, los cuales son componentes claves del desarrollo sustentable para satisfacer las necesidades materiales de la humanidad y reducir las desigualdades socio-económicas, el logro de la sustentabilidad energética se ha reconocido como un aspecto crítico para lograr el desarrollo sustentable [10]. La sustentabilidad energética se ha definido como el conjunto de prácticas, políticas y tecnologías que permiten el suministro de energía que las sociedades demandan, a los menores costos sociales, ambientales y financieros [1]. Por tal motivo, existe la necesidad de evaluar la sustentabilidad de los sistemas energéticos. Lo anterior ha sido señalado también por el Consejo Consultivo Alemán para Cambio Global [11]. En este documento se señala además que de no darse una transformación de los sistemas energéticos las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) podrían duplicarse e incluso cuadruplicarse.

A este respecto se han definido algunos criterios (que guardan una relación con los atributos mencionados anteriormente) de sustentabilidad que debe cumplir el sistema

---

<sup>4</sup> Un sistema es un conjunto de elementos que interaccionan para lograr un objetivo común.

energético para ser sustentable [10,11]. Entre estos encontramos: seguridad energética y el uso de energías renovables, incrementar el ahorro y el uso eficiente de la energía, reducir los impactos ambientales (entre ellos mitigación de GEI), viabilidad económica, generación de empleo y mejoramiento del nivel de vida de la población [10,11].

Dada la problemática ambiental y social actual del sistema energético, que lo hace insustentable, se hace necesario modificarlo de manera que, además de garantizar el suministro energético, contribuya a la mitigación de emisiones de GEI y otros gases contaminantes a la atmósfera, ayude a preservar los ecosistemas y la salud humana, contribuya a la satisfacción de las necesidades del ser humano y al mismo tiempo las fuentes de energía sean competitivas con los combustibles fósiles en términos de precios relativos. Para este fin ha sido reconocida la importancia de involucrar a las energías renovables como parte de un portafolio heterogéneo de fuentes de energía primaria [11]. A continuación presentamos una perspectiva general de las fuentes renovables de energía, tomando énfasis en la bioenergía y sus aplicaciones para el sector transporte. Por su parte, en el capítulo 2 se presenta una amplia discusión sobre el marco conceptual sobre el cual se basa la evaluación de sustentabilidad energética.

### **1.5 Las energías renovables**

Las energías renovables son aquellas que pueden continuar existiendo mediante procesos de regeneración, siempre que éstos se realicen a una tasa mayor que la de consumo [17]. Entre estas energías encontramos la energía eólica, la cual aprovecha el movimiento de las masas de aire en la atmósfera, del cual puede ser extraída energía cinética para ser convertida en energía eléctrica mediante turbinas de viento. Otra de las energías renovables es la hidroenergía oceánica y terrestre o hidroeléctrica, la cual a través de turbinas hidráulicas utiliza la energía cinética del agua en movimiento para generar electricidad, ya sea en un flujo natural de agua como en las llamadas mini hidráulicas (comúnmente menores a 5 MW), o la energía por la caída de agua en grandes presas, conocidas comúnmente como grandes hidroeléctricas. La hidroenergía oceánica consiste la generación de electricidad mediante en el aprovechamiento del movimiento de las olas, mareas y corrientes marinas, así como de los gradientes térmicos y salinos. La energía solar es otra

de las energías renovables, y consiste en aprovechar la radiación solar que recibe la superficie terrestre. La energía solar puede aprovecharse para generar calor que puede ser utilizado directamente para calentamiento de agua, y que a su vez puede ser utilizado en los hogares o bien, la radiación solar directa puede ser concentrada mediante los llamados concentradores solares, dicho calor a su vez puede ser utilizado para vaporizar agua u otros fluidos que puedan generar electricidad. La energía solar también puede generar electricidad sin necesidad de calentar fluidos, esto se puede lograr mediante el uso de celdas solares, las cuales pueden generar electricidad a partir del efecto fotovoltaico por eso también se les llama celdas fotovoltaicas. La energía geotérmica es otra de las opciones de energía renovable, consiste en aprovechar el flujo de calor que se origina debido al gradiente de temperatura que existe entre del interior de la tierra y la superficie de ésta. Esta energía se puede utilizar directamente para calefacción o bien para la generación eléctrica.

Es importante señalar que las energías renovables no están exentas de tener impactos ambientales, por ejemplo, los generadores eléctricos eólicos pueden causar la muerte de aves migratorias y de tener un impacto en la estética de los paisajes, las plantas geotérmicas tienen emisiones contaminantes. Una aparente limitación de las energías renovables es su intermitencia, lo que dificulta garantizar el suministro energético (sobre todo eléctrico) si no se cuentan con medios para el almacenamiento de energía, además los recursos eólicos, solares, hidroeléctricos y geotérmicos están limitados geográficamente. No obstante estas características las energías renovables tienen un potencial alto para su inclusión en el sistema energético mundial, donde se estima que éstas contribuyan con la mayoría de la oferta energética mundial (Figura 1.5), gracias también al reciente desarrollo de redes eléctricas inteligentes que acoplan de manera semi-automática la oferta y demanda de electricidad y a la innovación y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía.

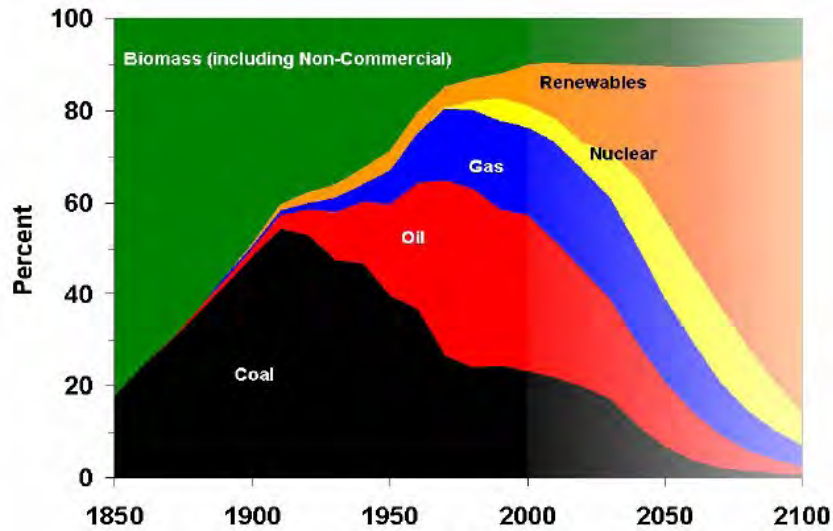


Figura 1.5 Evolución de la energía Primaria Global [58].

Otra de las energías renovables que tiene un alto potencial de uso es la llamada bioenergía. De acuerdo a los objetivos de esta tesis, abordaremos a continuación más a detalle el uso de la bioenergía y de una de sus variantes para su uso en el sector transporte.

### 1.5.1 La bioenergía

Se le llama bioenergía a toda aquella energía final o útil que se obtiene a partir de la materia viva o materia orgánica producida por los seres vivos, conocida como biomasa. Generalmente el término se aplica cuando se involucran usos de la biomasa con tecnologías modernas sin embargo el uso tradicional de la biomasa (fogones de leña) también puede ser considerado parte de la bioenergía, aunque para propósitos de este trabajo el término se aplicará únicamente al uso de la biomasa con tecnologías modernas. Se considera que la bioenergía presenta ventajas como una fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles: a) la biomasa puede ser almacenada, lo que da certidumbre en su suministro; b) puede ser transformada para aumentar su densidad energética y facilitar su manejo; c) puede ser producida y utilizada local o regionalmente, evitando la necesidad de utilizar transporte de largas distancias. También se le asocian ventajas ambientales como la mitigación de emisiones de GEI, ya que el CO<sub>2</sub> que emite la biomasa al quemarse es el mismo que absorbió mediante la fotosíntesis. El CO<sub>2</sub> biogénico no contribuye a incrementar

la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, proceso que se debe principalmente al CO<sub>2</sub> no-biológico proveniente de la quema de combustibles fósiles. El uso de la bioenergía también puede generar beneficios sociales y económicos como la diversificación de las economías rurales y oportunidades de empleo a lo largo de la cadena de producción, con el consecuente aumento de la actividad económica [20].

En algunas regiones y países se espera que la bioenergía juegue un papel fundamental en el suministro de energía. Por su parte, el Consejo Consultivo Alemán para el Cambio Global (WBGU) estimó que el potencial de participación de la bioenergía en el sistema energético mundial puede alcanzar los 104 EJ, lo que equivale a cerca del 22% de la producción de energía primaria en el mundo en 2008 [18].

Entre las distintas tecnologías para el uso de la bioenergía encontramos las opciones para la generación de electricidad como: la combustión directa, la gasificación, el biogás a partir de digestión anaerobia de residuos orgánicos; también existe la posibilidad de producción de biocombustibles líquidos que para el sector transporte como es el caso del biodiesel, el diesel Fischer-Tropsch y el etanol.

En esta tesis se analizará la sustentabilidad de la producción de etanol en México, esta discusión se basa en el marco teórico desarrollado en el capítulo 2. Para tal efecto a continuación discutimos el panorama del etanol en el mundo, y abordamos el caso de la energía, la bioenergía y el etanol en México.

#### 1.5.1.1 El Etanol en el Mundo

En el sector transporte la forma de aprovechamiento de la bioenergía con mayor uso en la actualidad es la producción de biocombustibles líquidos los cuales pueden usarse como combustibles puros o como mezclas con combustibles fósiles convencionales. Los biocombustibles pueden tener un carácter renovable, por obtenerse de cultivos y otras fuentes de biomasa y porque el CO<sub>2</sub> emitido en la combustión se origina en el CO<sub>2</sub> secuestrado de la atmósfera durante el crecimiento de las plantas que se usan como materia prima. Resulta de particular importancia el caso del etanol, debido a que es el biocombustible más utilizado en el mundo. El etanol es un alcohol producido por la

fermentación y destilación de materias primas que contienen azúcares o almidón. La producción mundial se incrementó de 17,000 millones de litros (ML) en el año 2000 a 65,614 ML en 2008 [59] y podría llegar al 7% del consumo energético mundial del sector transporte en 2030 [60]. Una de las materias primas más utilizadas actualmente para la producción de etanol es la caña de azúcar, empleada ampliamente en Brasil [21] con el 37% de la producción mundial de etanol en el año 2008 [59]. Otra de las materias primas principales para la producción de etanol es el maíz, el cual es ampliamente utilizado en Estados Unidos, el cual es el principal productor de etanol en el mundo, que contribuyó con una producción de 50,049 ML en 2010.

El etanol se ha promovido como un combustible limpio y renovable que reduce el calentamiento global y la contaminación del aire. Estas razones se han usado para justificar el otorgamiento de incentivos fiscales y la promulgación de leyes para la promoción y el uso del etanol. El uso que prevalece para el etanol se encuentra como combustible en los vehículos de ignición por chispa. La cantidad de etanol en mezclas con gasolina varía desde el 5% del volumen hasta el 100% que puede utilizarse directamente en automóviles Flex-fuel. En algunos países las mezclas más comunes son con gasolina del 5% al 10% del volumen; en Brasil la mezcla es de hasta el 26% de etanol anhidro (deshidratado) y 85% de etanol que puede utilizarse en todo tipo de automóviles con motor a gasolina.

El alcohol etílico o etanol es el más conocido de los alcoholes. Puede obtenerse químicamente a partir del etileno, un producto de la refinación del petróleo; a partir del etano, un constituyente del gas natural; o bioquímicamente a través de azúcares fermentables, derivados típicamente del azúcar, cultivos con almidón, celulosa y otras formas de biomasa. El hecho de poder ser producido a partir de cultivos, le da un carácter renovable. De aquí en adelante se hablará de etanol de origen biológico, también conocido como bioetanol, producto de cultivos o de otra materia orgánica.

Dentro de las metas internacionales sobre el uso de etanol y otros biocombustibles, encontramos las metas de la Unión Europea establecidas por la Directiva de Biocombustibles, la cual fijó para el año 2020 que el 10% de la energía usada por el sector transporte debe provenir de los biocombustibles [61]. Por otra parte en Estados Unidos la

presidencia propuso como metas que para en el año 2012 el etanol celulósico (también llamado lignocelulósico o de segunda generación) debiera ser competitivo en costo con el etanol obtenido del maíz. Además se propone un incremento en el suministro de combustibles alternativos a 35 mil millones de galones anuales para el 2017 (132.5 mil millones de litros) [62].

En el mundo los esfuerzos para el cumplimiento de estas metas se ven reflejados en las inversiones para la llamada Energía Sustentable, donde el 26% de las inversiones se destinan a los biocombustibles líquidos, sobre todo en inversiones para la producción de etanol, solamente detrás de las inversiones en energía eólica [63].

### **1.6 Panorama de la energía en México**

En México el consumo de energía primaria llegó a poco más de 7767 PJ en 2008, donde la fuente principal de energía fue el petróleo, seguido del gas natural (Figura 1.6). A diferencia de la demanda de energía mundial el carbón no es tan importante en el consumo de energía en México debido a que la mayor parte de la generación eléctrica se realiza con petróleo y gas natural. Las energías renovables en México tienen una participación de un 10% en donde la hidroelectricidad representa el 4.5%, y el consumo de leña y bagazo de caña alcanzan el 4%, mientras que la energía eólica y la geotérmica participaron con el resto.



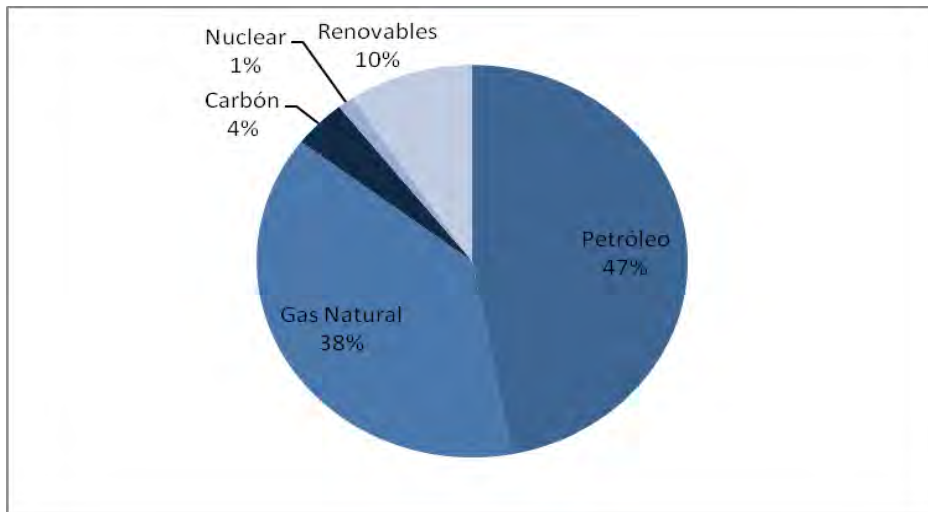


Figura 1.6 Consumo en México de Energía primaria en 2008 [64].

El sector con mayor consumo es el sector transporte con el 41%, en su mayor parte debido a la demanda del autotransporte. El 90% del consumo energético del transporte se satisface con gasolina y diesel [64]. Otros sectores consumen menor cantidad de energía como el industrial que tuvo un consumo del 23% de la energía primaria. Los sectores energético y residencial consumieron el 14% y el 13.4% respectivamente, mientras que el sector agrícola representó el 2.4%, el sector comercial el 2.1%.

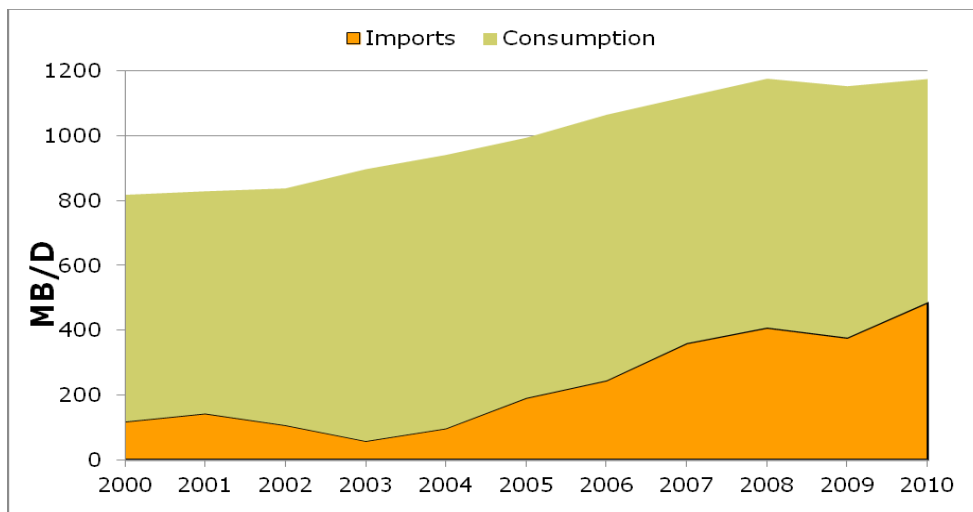


Figura 1.7 Consumo e importaciones de gasolina y diesel en México [65].

Es importante destacar el caso del consumo energético del sector transporte ya que además de ser el sector con la mayor demanda de combustibles, la producción nacional de gasolina y diesel son insuficientes para satisfacer la demanda, por lo que es necesario importar alrededor del 41% de la gasolina y diesel que se consumen en el país (figura 1.7).

Esta situación además tiene un efecto en la balanza de pagos ya que el dinero empleado para la importación de gasolina y diesel equivale el 47% de los ingresos por la venta de petróleo crudo (figura 1.8) [65]. De esta manera, los combustibles alternos (incluido el etanol) en el sector transporte son de importancia fundamental para el caso de México.

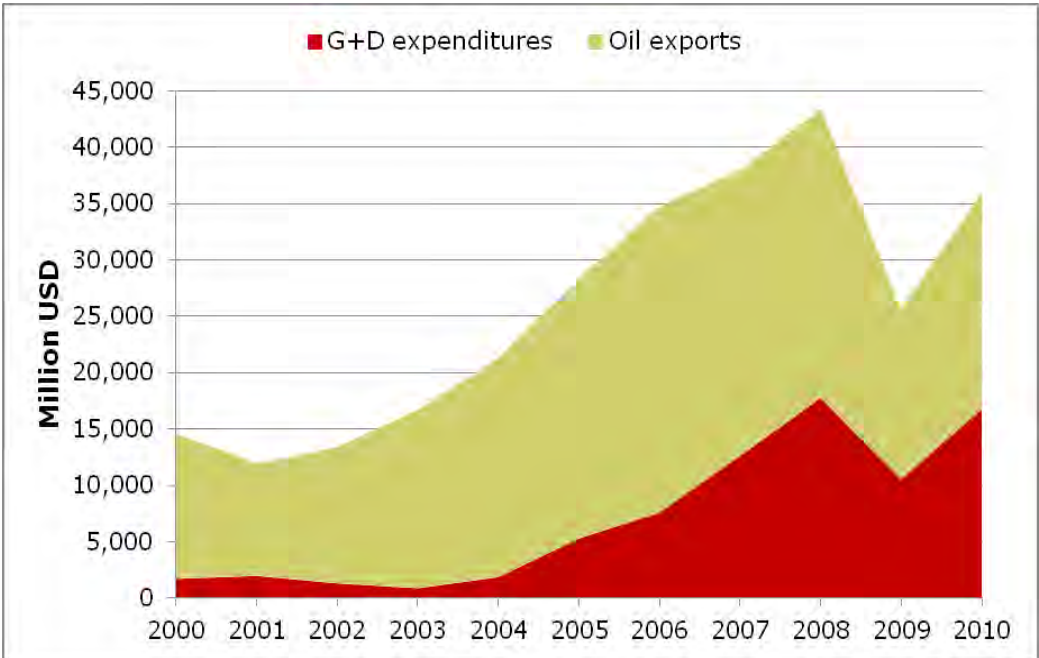


Figura 1.8 Ingresos por la venta de petróleo crudo y egresos por la importación de gasolina y diesel [65].

### 1.6.1 Bioenergía en México

En México la participación de la biomasa en la oferta interna bruta de energía primaria durante el 2008 fue de 4.7%, (estimación del Balance Energético Nacional 2008) misma que en 1965 era de poco más del 15%. Estos datos confirman que su participación relativa

es decreciente, aunque en términos absolutos el consumo de bioenergéticos (leña, carbón vegetal y bagazo) ha permanecido casi constante [64].

Las formas de biomasa más utilizada en nuestro país son la leña y el bagazo de caña. Tal y como aparece en el Balance Nacional de Energía. Actualmente la leña es consumida por alrededor de 28 millones de personas en el medio rural, principalmente para la cocción de alimentos y para pequeñas industrias como tabiqueras, mezcaleras, panaderías y tortillerías. El bagazo de caña se usa como combustible en los ingenios azucareros [66].

Actualmente las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de la biomasa en el país son en su mayoría ineficientes, lo que implica un desperdicio de recursos y de energía, además de generar impactos negativos en el ambiente. Tomando en cuenta la experiencia de otros países, se piensa que el uso de la biomasa con tecnologías más eficientes puede ayudar a la diversificación energética del país [67].

Existen diversas fuentes que señalan el potencial de biomasa estimado para México, una de ellas reporta entre 3035 y 4550 PJ/año -equivalente entre el 54% y 81% de la oferta interna bruta de energía primaria en el 2004 [68]. Otra estimación reporta un potencial de 4,000 PJ que equivale al 40% del consumo energético del país en 2004 [69].

Un estudio sobre la inserción de tecnologías del aprovechamiento de la biomasa en México [67] arrojó resultados que muestran que la biomasa es una opción real para la diversificación energética en el largo plazo, ya que el aprovechamiento de diversas fuentes de bioenergía podría representar hasta el 16% del consumo de energía en México en los sectores residencial, transporte y electricidad para el año 2030, destacando el potencial de la bioenergía en el sector transporte.

#### 1.6.2 El Etanol en México

México cuenta con una amplia tradición en el cultivo de la caña de azúcar -el primer cultivo data de 1524- introducido por los conquistadores españoles y el primer ingenio data de 1526, la primera industria de la Nueva España. Actualmente la industria del azúcar de caña genera 450 mil empleos directos y 2.2 millones de empleos indirectos y aporta el 2.5% del

PIB manufacturero [70]. Durante la zafra 2008/2009 se cosecharon 663,057 hectáreas, con 42.5 millones de toneladas de caña molida en los ingenios, y con una producción resultante de 4.96 millones de toneladas de azúcar. Se produjeron además un total de 1.49 millones de toneladas de melaza, de las cuales se destinaron 0.054 millones de toneladas (el 3.6%) para la fabricación de etanol no carburante, con una producción de 14.5 millones de litros [71]. El resto de la melaza se exporta principalmente a los Estados Unidos, y representa un potencial importante para la fabricación de etanol. Si se utilizara toda para este fin, se podrían producir 399.3 millones de litros de etanol.

Por otra parte, un estudio reciente estimó que existen 2.9 millones de hectáreas potencialmente cultivables con caña de azúcar donde se podrían producir alrededor de 16,240 millones de litros de etanol -que equivale aproximadamente a la actual producción de etanol en Brasil [69]. En el estudio mencionado se calculó el potencial técnico para el desarrollo de nuevas superficies de cultivo de caña de azúcar considerando las siguientes condiciones y supuestos, necesarios para la sustentabilidad del cultivo y para evitar el conflicto de uso de tierras para alimentos o para energía: a) rangos de lluvia; b) pendientes; c) frecuencia de heladas; d) exclusión de áreas naturales protegidas y áreas cultivadas; e) cubierta del suelo (sólo las tierras con praderas naturales y pastizales cultivados se consideraron aptas); f) se asumieron sólo tierras con potenciales de producción medios y altos.

En años recientes se ha reavivado el debate en México sobre la conveniencia del uso de etanol en el sector transporte, con los objetivos de reducir las emisiones de GEI, diversificar las fuentes energéticas y aprovechar los posibles beneficios económicos ligados a la producción del etanol como la generación de empleos en el campo y en la industria. En el año 2008 se aprobó la Ley para la Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México [34], en donde se considera el uso de etanol como oxigenante en los vehículos automotores a gasolina que circulan en el país. Como resultado, se elaboró el Programa de Introducción de Bioenergéticos, en el marco de la Estrategia Intersecretarial de Bioenergéticos. El programa pretende desarrollar experiencia y brindar las condiciones para el desarrollo de la industria de los bioenergéticos. Además propone establecer criterios de sustentabilidad en

la producción de etanol, donde entre otros el balance de emisiones de GEI y el balance energético son considerados criterios importantes [35].

### **1.7 Sustentabilidad de la producción de etanol**

En años recientes han surgido una gran cantidad de críticas a la producción de biocombustibles. Numerosas organizaciones no gubernamentales e investigadores han alertado sobre los efectos negativos que los biocombustibles pueden tener sobre el clima, los relacionados a la pérdida de biodiversidad debido al incremento de la deforestación; y los impactos debidos al uso de monocultivos que pueden amenazar la seguridad alimentaria al competir por tierras para la producción de alimentos, y que además, pueden ser causantes de erosión de suelo y de agotamiento de recursos acuíferos.

Algunos de estos efectos de los biocombustibles líquidos sobre la sustentabilidad se presentan a continuación.

#### **1.7.1 Balance energético y emisiones GEI**

Los balances de emisiones de GEI y el balance energético en el ciclo de vida son de gran importancia porque evalúan las emisiones de GEI y el consumo de energía primaria fósil en toda la cadena productiva de la producción de etanol, o sea su potencial para mitigar emisiones y su grado o nivel de sustitución de combustibles fósiles. No obstante el rápido crecimiento de la producción mundial de etanol, sus beneficios se han cuestionado ampliamente en cuanto a la mitigación de GEI y como sustituto de energía fósil. Se han llevado a cabo varios estudios de emisiones GEI y de balances energéticos con enfoque de ciclo de vida de la producción; los resultados son muy variados, inclusive en ocasiones contradictorios entre sí [24-32]. La explicación de la variedad de resultados se encuentra en que los estudios presentan diferentes consideraciones metodológicas en el análisis del ciclo de vida como: diferentes límites del sistema, distintos niveles de aplicación de fertilizantes, factores de emisión, consideración o no de co-productos, y diversos métodos de asignación de emisiones a co-productos, entre las principales diferencias.

Existen emisiones por el uso de suelo cuando se provoca un cambio en los almacenes de carbono en la vegetación y el suelo. Éstas se pueden diferenciar en emisiones directas e indirectas. Las emisiones por el Cambio en el Uso de suelo Directo (CUSd) son las debidas a las variaciones de almacenes de carbono en la biomasa aérea (la que sobresale de la superficie), la biomasa subterránea (rizomas y raíces) y el carbono orgánico en el suelo; en esta metodología se supone que todo el carbono perdido con el cambio de uso de suelo se transformará en CO<sub>2</sub>. Estas emisiones tienen una influencia negativa en los balances de GEI cuando se cultivan áreas con un alto contenido de carbono almacenado, como en los bosques, resultando en balances negativos de CO<sub>2</sub> para el etanol [72,73].

Las emisiones por el cambio indirecto en el uso de suelo ocurren cuando la expansión del área de cultivo para la producción de biocombustibles tiene como resultado el desplazamiento de cultivos o pastos sobre áreas que no eran cultivadas previamente. Estas emisiones indirectas no pueden ser atribuidas individualmente a procesos de producción específicos ya que dependen de la demanda del mercado, de los precios y de la disponibilidad de productos sustitutos. Este es un fenómeno complejo que no ha sido entendido aún del todo por la comunidad científica aunque hay intentos por fijar algunos valores por default para algunas cadenas de producción, sin embargo las incertidumbres en estos valores son muy altas [74].

Hasta el momento no existen evaluaciones publicadas de balances de GEI y de energía del ciclo de vida de la producción de etanol en México. Esto se debe principalmente a la ausencia de información estadística confiable y sistematizada sobre los insumos utilizados en las etapas agrícola e industrial. Sin embargo ha habido esfuerzos por hacer aproximaciones utilizando información obtenida en la literatura, valores por defecto y algunos datos de campo [CMM comunicación personal] [75-77].

#### 1.7.2 Impactos sobre la seguridad alimentaria

En 2008 y 2011 los precios de los alimentos alcanzaron sus niveles más altos en la historia, como consecuencia, la FAO estima que 75 millones de personas pasaron a un estado de inseguridad alimentaria adicionándose a los 850 millones que ya existían [78].

El uso de cereales para la producción de etanol se ha mencionado como una de las causas del incremento de los precios de los alimentos (aunque esta no es la única causa, otras son el incremento de la población y el incremento del consumo de carne, desaceleración en el crecimiento de la producción agrícola, el aumento en los precios de la energía, aumento de los costos de producción agrícola, eventos climáticos adversos, especulación, entre otros [78]).

El incremento del uso de los cereales para la producción de etanol con el objetivo de lograr las metas de la Unión Europea de sustituir el 10% del consumo energético del sector transporte con biocombustibles y de otras iniciativas internacionales, puede tener grandes consecuencias en los precios de los alimentos a nivel mundial. Nonhebel [78] estima que el cumplimiento de las meta de biocombustibles de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) implicaría utilizar cuatro veces el volumen de cereales que actualmente se comercializa a nivel global. El aumento de los precios entonces puede tener un efecto importante en la seguridad alimentaria de los países que no son autosuficientes en la producción de alimentos [78].

Por tal motivo, cobra importancia fundamental identificar las materias primas que tienen un menor impacto sobre la seguridad alimentaria.

### 1.7.3 Impactos sobre la disponibilidad de agua

El agua fresca es un recurso escaso, más de mil millones de personas en el mundo carecen de servicios adecuados de agua potable para consumo, y más de dos mil millones carecen de agua suficiente para sus necesidades sanitarias [79]. Estos problemas se agravan si consideramos que la demanda por el recurso se intensifica a medida que la población y el desarrollo económico aumentan. Se espera que para el año 2025 dos tercios de la población experimentarán algún tipo de estrés hídrico [80].

Esta importancia del agua en relación con la bioenergía ha sido recalcada en un reciente reporte [80], donde se señala que la disponibilidad de agua indudablemente afectará el grado de participación de la bioenergía en el sistema energético. El caso del agua es particularmente importante para la producción de biocombustibles líquidos de primera

generación, incluido el etanol, ya que el sector agropecuario tiene actualmente una participación de alrededor del 85% del consumo global de agua fresca [80]. Esta preocupación se ha visto reflejada en trabajos de investigación que exploran el tema [81-84], llegando a la conclusión de que el agua será una limitante para el desarrollo de la producción de la bioenergía, donde se incluye el etanol.

#### 1.7.4 Factibilidad económica

La factibilidad económica de los proyectos energéticos es una de las cuestiones más importantes para la decisión de llevar a cabo o no un proyecto. Esta es una cuestión que es importante también para la producción de etanol ya que es fundamental lograr el mantenimiento del proyecto sin necesidad de subsidios, lo que contribuye a la sustentabilidad en la dimensión económica.

#### 1.7.5 Efectos sociales

La bioenergía representa una oportunidad para atraer inversiones y fomentar el desarrollo [48]. La producción de biocombustibles requiere de cultivos como materias primas, mientras que en los países en desarrollo el sector agrícola es intensivo en mano de obra, por lo que la producción de biocombustibles, y de etanol en particular, representa una oportunidad para la creación de empleos. De igual forma se crean también empleos en el procesamiento de la materia prima y en las otras partes de la cadena de producción [48].

En el capítulo siguiente abordamos el marco teórico general sobre el que se analiza la sustentabilidad de la producción de etanol en México y la metodología de la tesis.



## **Capítulo 2**

### **Marco teórico y Metodología**

En este capítulo planteamos el marco teórico requerido para el análisis de sustentabilidad de la producción de etanol partiendo de un marco general para la evaluación de sustentabilidad de la bioenergía. Posteriormente se presenta la metodología general del proyecto y las metodologías particulares para la evaluación de cada uno de los indicadores, y su integración en un índice.

#### **2.1 Marco teórico**

##### **2.1.1 Marcos para la evaluación de sustentabilidad de la bioenergía**

Con el propósito de partir de un marco con el cual partir para analizar la sustentabilidad de la producción de etanol, se identifican en la literatura tres trabajos importantes que proponen de manera general un marco para la evaluación y análisis de la sustentabilidad de la bioenergía [36-38].

En términos generales, los tres marcos consideran que la sustentabilidad debe ser evaluada considerando los aspectos ambientales, económicos y sociales de las opciones de bioenergía. De igual forma, los tres marcos presentan dos etapas muy marcadas en el proceso de evaluación, la primera de ellas implica una definición de criterios de sustentabilidad y sus respectivos indicadores; en tanto que en la segunda etapa involucra aspectos de integración de los indicadores, donde pueden utilizarse los índices de sustentabilidad, los llamados métodos multicriterio [36,37] o bien empleando lógica difusa [38]. Estas mismas consideraciones en cuanto a las dimensiones de la sustentabilidad y etapas del proceso se pueden observar en evaluaciones de sustentabilidad de biocombustibles [39] y tecnologías energéticas [40,41].

Detallando un poco más cada etapa del proceso de evaluación de sustentabilidad de la bioenergía, en principio los marcos señalan la necesidad de considerar las dimensiones

social, ambiental y social [36], para lo cual es necesario aproximaciones integrales que modelen en conjunto estas dimensiones, a la vez de considerar todos los componentes del sistema de producción (producción de la materia prima, tecnología de conversión, transporte) [37].

Como ya hemos señalado, la definición de sustentabilidad energética implica aspectos ambientales, sociales y económicos, por lo que es necesario abordar el análisis de la sustentabilidad de opciones de bioenergía (donde se incluye al etanol) considerando estas tres dimensiones, de hecho, Masera et al. señala [42] que abordar una sola de las dimensiones de la sustentabilidad no puede ser descrito como una evaluación de la sustentabilidad. De esta manera, los marcos de evaluación de sustentabilidad de la bioenergía son consistentes en cuanto a las dimensiones de sustentabilidad de evaluaciones en otros campos como en el manejo de recursos naturales [42].

La segunda necesidad señala considerar todos los componentes del sistema, para lo cual el concepto de ciclo de vida toma importancia. A este respecto Klöpffer [16] destaca que cualquier método de evaluación de los aspectos ambientales, sociales y económicos para la evaluación de sustentabilidad, deben tomar en cuenta todo su ciclo de vida, es decir, desde la extracción de la materia prima, la producción, el uso y reciclado, y la disposición de los desechos [16].

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se convirtió en una práctica estandarizada por la Organización Internacional de Estándares (ISO por sus siglas en inglés) a mediados de los 1990's. La metodología genérica de realización de ACV (según Norma ISO 14040 y 14041), abarca: definición del alcance del estudio y de la unidad funcional (la unidad con la cual se va a evaluar el desempeño del sistema estudiado), realización de inventario (de entradas y salidas al sistema de materiales, energía y emisiones), definición de los impactos ambientales, evaluación de los mismos y representación de resultados para el análisis posterior y la obtención de conclusiones. Hasta ahora el ACV como tal se limita a los impactos ambientales, donde no se consideran los impactos sociales y económicos; sin embargo, se han realizado varios intentos para integrar estas dimensiones a los ACV, de

manera que los ACV, por sí mismos, puedan ser utilizados como herramientas para evaluaciones de sustentabilidad [16].

La idea fundamental dentro del ACV, consiste en realizar una aproximación de sistemas, ya que, en palabras de Klöpfer [16], *no tiene sentido mejorar una parte del sistema, en un paso del ciclo de vida, si este “mejoramiento” tiene consecuencias negativas para otras partes del sistema.*

Una vez establecidas las dimensiones de la sustentabilidad e identificados los componentes del sistema en el ciclo de vida de las alternativas bioenergéticas, el siguiente paso en los marcos de evaluación de la bioenergía es la definición de criterios de sustentabilidad y sus respectivos indicadores.

Los criterios son atributos generales de sustentabilidad, y representan un nivel de análisis más general que los indicadores. Los indicadores de sustentabilidad representan los parámetros de medición para la comparación entre diferentes estados o estructura de un sistema [1]. Los indicadores son importantes para hacer operativos los atributos o criterios de sustentabilidad que se puedan medir localmente, es decir, son herramientas útiles para reducir la complejidad de la descripción de un sistema [43]. Astier et al. [43] señalan que los indicadores dependen entre otras cosas de las características del problema bajo estudio, de la escala del proyecto y de la disponibilidad de datos.

Los marcos de evaluación de sustentabilidad señalan que para la definición de los criterios de sustentabilidad es necesario capturar los atributos de sustentabilidad involucrando los intereses de todas las partes interesadas (stakeholders) [36], como pueden ser productores de biomasa, procesadores industriales, transportistas, etc.

En este sentido, se han desarrollado criterios e indicadores de sustentabilidad para diferenciar biocombustibles sustentables de los que no lo son, propuestos en el contexto de esquemas de certificación [44]. En general, las propuestas de estándares de certificación incluyen sobre todo criterios ambientales: requerimientos como el balance de GEI, protección de la biodiversidad, conservación de suelo y agua, y calidad del aire (tabla 2.1);

aunque también se pueden encontrar criterios socio-económicos como contribución al bienestar de los trabajadores y de la población local, así como el logro de la rentabilidad económica [44].

Tabla 2.1 Principios ecológicos para la producción de biocombustibles.

Principios y criterios	GER	EU Dir RES	NL	UK	RSB
Ahorro emisiones GEI	X	X	X	X	X
Preservación de los almacenes de carbono sobre el suelo	X	X	X	X	X
Preservación de carbono subterráneo	X	X	X	X	X
Competencia con producción de alimentos y suministro local de energía			X		X
Producción de biomasa y daños a la biodiversidad	X	X	X	X	X
Producción de biomasa y conservación del suelo	X		X	X	X
Producción de biomasa y conservación de la cantidad y calidad del agua	X		X	X	X
Producción de biomasa y emisiones de contaminantes del aire	X		X	X	X

GER: Propuesta Alemana; EU Dir RES: Directiva Europea de Energías Renovables; NL: Propuesta Holandesa; UK: Propuesta Inglesa; RSB: Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sustentables [85].

Tabla 2.2 Criterios socio-económicos de sustentabilidad.

Principios y criterios	NL	UK	RSB
La producción de biomasa contribuye a la prosperidad local y nacional	X		X
La producción de biomasa contribuye al bienestar de los trabajadores y de la población local	X		X
Estándares Laborales		X	
Derechos de propiedad de la tierra		X	X

NL: Propuesta Holandesa; UK: Propuesta Inglesa; RSB: Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sustentables. Elaboración propia basada en [85].

También existen criterios que consideran los aspectos socioeconómicos de la producción de biocombustibles, en la tabla 2.2 se presentan algunos de estos indicadores y quienes los proponen.

Una vez definidos los criterios e indicadores de sustentabilidad que reflejan las condiciones del sistema de bioenergía para lograr la sustentabilidad, y que estos a su vez consideran los intereses de todas las partes involucradas, el siguiente paso es la integración de los indicadores.

La gran variedad de indicadores para la evaluación de sustentabilidad de un sistema representan un problema para los hacedores de políticas, ya que estos demandan información agregada [45], o dicho de otra forma, es necesario integrar los resultados de los diferentes indicadores de manera que ayuden a evaluar entre alternativas con diferentes tipos de consecuencias sobre la sociedad y el ambiente. Esta integración permite realizar una calificación de las alternativas analizadas.

Esto implica buscar un procedimiento de presentación de resultados en el cual queden explícitos los problemas y beneficios de cada sistema o alternativa, lo cual no es fácil debido a que la información contenida en los indicadores es muy variada, por lo que se ha

llegado a reconocer que “la integración de resultados en el análisis de sustentabilidad es actualmente un área abierta de investigación, por lo que no existe un consenso o un método claramente preferido” [42].

Se identifican al menos dos enfoques para la presentación e integración de resultados: las técnicas cuantitativas y cualitativas [42].

Entre las técnicas cuantitativas encontramos la elaboración de índices de sustentabilidad. En términos generales el procedimiento consiste en construir índices para cada grupo de indicadores, estos índices se obtienen normalizando los datos según que tanto cumplen con el objetivo deseado. Posteriormente estos índices se agregan de tal forma que cada sistema pueda caracterizarse por un valor numérico único. Los índices se pueden agregar mediante promedios simples o ponderados. Como resultado del proceso, cada sistema tiene un índice numérico de sustentabilidad que permite compararlo con los otros sistemas analizados [42]. Entre las desventajas del uso de los índices encontramos que en su construcción suelen requerir de decisiones arbitrarias en la elección de las variables, parámetros y los métodos de agregación necesarios para medir el desempeño de un sistema (subjetividad en la evaluación) [43]. Otra desventaja de los índices es que pueden quedar ocultos los elementos más importantes que determinan la sustentabilidad del sistema estudiado [43].

Entre las técnicas cuantitativas también se encuentran los llamados análisis multicriterio para la toma de decisiones, los cuales son propuestos por dos marcos de evaluación de sustentabilidad de la bioenergía [36,37]. En estos modelos los indicadores pueden ser numéricos o valorarse de acuerdo a una escala ordinal (ejemplo: alto, medio, bajo). Las diferentes alternativas pueden analizarse posteriormente mediante matrices de decisión, por medio de índices de concordancia y discordancia y otras técnicas [42]. En cuanto a la aplicación de los métodos multicriterio para la toma de decisiones en los sistemas energéticos encontramos el trabajo de Afgan y Begic en donde se evalúa la sustentabilidad de varias opciones para la generación de energía eléctrica en Bosnia para encontrar las tecnologías y la capacidad más adecuadas para ese país [46]. También se encuentra una tesis realizada en el CIE en donde se utiliza el Método Multicriterio, Proceso Analítico de

Jerarquización (AHP por sus siglas en inglés) para la evaluación de sustentabilidad de plantas generadoras de electricidad [47].

Por otra parte, las técnicas cualitativas tienen como objetivo integrar los resultados de la evaluación de una manera sencilla y clara. En casos como los análisis de sustentabilidad en los que se utiliza un gran número de indicadores, las técnicas cualitativas permiten visualizar conjuntamente el resultado de los diferentes indicadores seleccionados. Masera et al. [42] mencionan algunos ejemplos que se utilizan en el manejo de recursos naturales, mas estas técnicas cualitativas no son muy comunes en la evaluación de sustentabilidad de sistemas energéticos.

Al final del proceso de integración, se ha reconocido la importancia de llevar a cabo análisis de sensibilidad [37], ya que no importando que método de integración utilicemos al final habrá algunos indicadores (y por lo tanto criterios) que tendrán asignado un mayor peso que otros. El análisis de sensibilidad permite conocer cómo cambia la calificación de cada alternativa al considerar diferentes ponderaciones de los indicadores.

Basado en los marcos para la evaluación de la bioenergía se pueden identificar los pasos necesarios para la evaluación de la sustentabilidad de la producción de bioenergía: 1) definición del problema; 2) generar una lista de alternativas o sistemas a analizar; 3) especificar un conjunto de criterios e indicadores de sustentabilidad a evaluar (considerando las dimensiones ambiental, económica y social, además de emplear un enfoque de ciclo de vida); 4) evaluar los indicadores; 5) realizar la integración de los indicadores; 6) hacer análisis de sensibilidad.

Si bien hasta el momento no ha habido trabajos que evalúen la sustentabilidad de la producción de etanol bajo alguno de los marcos conceptuales mencionados, sí se han realizado evaluaciones de la sustentabilidad de la producción de etanol. Existen algunos trabajos realizados para evaluar la sustentabilidad de la producción de etanol de caña de azúcar en Brasil. El primero de ellos [48] propone un conjunto de 17 criterios de sustentabilidad con el objetivo de identificar los cuellos de botella que podrían presentarse para lograr la certificación de la producción de etanol de caña, basado en el sistema

propuesto en Holanda [48]. El trabajo discute la dificultad de establecer indicadores cuantitativos para todos los criterios, en particular para la evaluación de biodiversidad, seguridad alimentaria, organismos genéticamente modificados (OGM). De igual forma se discute la dificultad de encontrar toda la información necesaria para poder evaluar los indicadores. Los indicadores que tienen una mayor factibilidad de ser aplicados fueron los de emisiones GEI y de balance energético, ambos calculados a partir de un Análisis del Ciclo de Vida, aunque el caso de las emisiones por el cambio en el uso indirecto en el uso de suelo no es posible aún establecer una metodología acordada que cuantifique de manera confiable estas emisiones. Las desventajas principales del método propuesto para aplicarlo a otros casos son, la dificultad de aplicar el análisis de forma completa (no hay indicadores para todos los criterios), la carencia de información suficiente para evaluar todos los indicadores, y la dificultad para identificar posibles interacciones entre los diferentes criterios de sustentabilidad.

Otros dos trabajos [21, 49] tienen la intención de demostrar la sustentabilidad a nivel regional de la producción de etanol en Brasil. A partir de datos de mitigación de gases GEI, balance energético (ambos en el ciclo de vida), cambio en el uso de suelo, emisiones contaminantes, uso de agua, aspectos socio-económicos como la creación de empleos y la rentabilidad económica, Goldemberg realiza una revisión bibliográfica para señalar las ventajas de la producción de etanol de caña de azúcar y como esta producción no ha tenido efectos adversos en cada uno de los aspectos ambientales y socioeconómicos analizados, por lo que concluye que la producción de etanol en Brasil es sustentable. En este mismo sentido encontramos la evaluación de Walter et al. [49], aunque en su evaluación hace una exploración mayor sobre el cambio en el uso de suelo (donde demuestra que la pérdida del Cerrado Brasileño se debe principalmente a la expansión del cultivo de Soya), además de evaluar emisiones de GEI y criterios socio-económicos.

Por su parte Pereira y Ortega [50] evalúan la sustentabilidad de la producción de etanol en Brasil considerando emisiones de GEI, balance energético, demanda de tierra, agua y algunos materiales. El estudio no toma en cuenta aspectos socio-económicos por lo que de acuerdo a nuestros marcos no podría considerarse como una evaluación de sustentabilidad,



además la metodología no contiene una integración de los indicadores que permita calificar entre diferentes opciones de producción.

Existen en la literatura otros tipos de estudios que a pesar de no ser evaluaciones de sustentabilidad evalúan aspectos ambientales, económicos y sociales. Entre estos estudios tenemos el de Chávez-Rodríguez y Nebra [51] donde analizan emisiones GEI, huella ecológica y uso de agua para la producción de etanol de caña de azúcar en Brasil, etanol de maíz en Estados Unidos y gasolina. El estudio realiza una comparación de cada uno de los aspectos entre sí, pero no integra las evaluaciones para lograr una calificación. Los resultados muestran un mejor desempeño en dos de los tres evaluados para el caso de la caña de azúcar en Brasil.

Por su parte el estudio de Luo et al. [52] evalúa en el ciclo de vida las emisiones de GEI y el costo de producción aplicado al caso del etanol de caña de azúcar en Brasil, y lo comparan con la gasolina. Debido a que sólo se valúan dos indicadores no es necesario establecer una metodología para integrarlos y poder calificar entre opciones, sin embargo el uso del ciclo de vida para el cálculo en los costos de producción, con el llamado *Life Cycle Costing*, es novedoso.

Otro de los estudios revisados [53] evalúa el balance energético, emisiones contaminantes del aire y la rentabilidad económica aplicadas a la producción de etanol de maíz, trigo y yuca en China. El estudio compara cada indicador entre sí para las diferentes opciones y concluye que la mejor materia prima es la yuca, sin embargo se encontraron algunos trade-offs (intercambios de recursos) que hacían no tan clara este resultado. Esta conclusión no requirió de una integración de indicadores porque solamente son tres, sin embargo una mayor inclusión de indicadores pudiera haber hecho difícil la identificación de la mejor opción sin una integración de los indicadores.

En los estudios referenciados sobre la evaluación de algunos aspectos de la sustentabilidad de la producción de etanol, se observan algunas tendencias que nos apuntan a las características que debe tener la producción de etanol para ser sustentable. Entre estas

podemos mencionar a la mitigación de GEI, donde se ha mencionado que un factor fundamental radica en no establecer los cultivos en áreas con un alto contenido de carbono como es el caso del *Cerrado Brasileño* [49], y también se remarca la importancia que tienen aquellos casos en donde se obtiene un buen rendimiento agrícola sin necesidad de utilizar una gran cantidad de insumos, como es el caso de los fertilizantes, ya que éstos tienden a tener una mayor emisión de GEI [49,51]. También podemos mencionar el uso de co-productos, ya que si éstos son aprovechados se logra una mayor reducción de las emisiones GEI y además su venta contribuye a mejorar el costo de producción del etanol [53].

Partiendo de las experiencias anteriores es importante señalar lo dicho por Buchholz et al. [37], quienes recalcan la importancia que en la evaluación de la sustentabilidad se simplifique la complejidad del sistema, utilizando un número restringido de criterios estructurados de tal forma que clarifiquen las relaciones impactos y salidas, donde la importancia radica en encontrar “un puñado de causas” que puedan explicar satisfactoriamente al sistema y que puedan ser utilizados para hacer al sistema más sustentable.

Basado en la idea de Buchholz et al., en esta tesis planteamos un análisis de sustentabilidad basado en los marcos conceptuales señalados y utilizando un número de criterios e indicadores reducidos que permiten identificar las partes del sistema que contribuyen en mayor medida a la sustentabilidad del sistema, en este caso, de las opciones para la producción de etanol en México.

En el capítulo 2 se presenta la metodología de la tesis, en tanto en el capítulo 3 se presentan los resultados de la investigación y posteriormente las conclusiones.

## **2.2 Metodología**

Basado en los marcos para la evaluación de la bioenergía (Capítulo 1) la metodología empleada en este trabajo se puede dividir en 4 pasos generales: 1) generación de un conjunto de alternativas para la producción de etanol (materias primas y tecnologías de

producción); 2) definición de un conjunto de criterios e indicadores de sustentabilidad a evaluar considerando las dimensiones ambiental, económica y social; 3) evaluar los indicadores con su metodología específica; 4) realizar la integración de los indicadores.

### 2.2.1 Cultivos y tecnologías de producción potenciales

Debido a la importancia del volumen de producción, al potencial de expansión de los cultivos, y a la disponibilidad de tecnologías probadas comercialmente en otros países, las materias primas que se identifican aptas para la producción de etanol en México son:

Caña de azúcar. La caña de azúcar es uno de los dos cultivos que se utilizan más ampliamente en el mundo para la producción de etanol. Actualmente se cultivan anualmente en México alrededor de 650 mil hectáreas con caña de azúcar. Una estimación [69] señala que la superficie apta para la expansión sustentable de este cultivo podría alcanzar los 2.9 millones de hectáreas adicionales (figura 2.1). En este estudio se calculó el potencial técnico para el desarrollo de cuatro nuevas superficies de cultivo: caña de azúcar, sorgo grano, *Jatropha curcas* y palma aceitera. Este cálculo consideró las siguientes condiciones y supuestos: a) rangos de lluvia; b) pendientes; c) frecuencia de heladas; d) áreas protegidas (todas las zonas protegidas fueron consideradas no aptas); e) cubierta del suelo (sólo las tierras con praderas naturales y pastizales cultivados se consideraron aptas); f) se asumieron sólo tierras con potenciales de producción medios y altos.

Sorgo grano. El sorgo grano es una de las materias primas que se estima puedan tener una participación importante en la producción de etanol debido a que se dice es un cultivo que requiere pocos insumos en campo y que puede tener dos cosechas por año. Actualmente en México se cultivan alrededor de 1.8 millones de hectáreas de sorgo de las cuales alrededor del 75% son de temporal. Con la estimación del estudio referido arriba se estimó que el área de cultivo podría aumentar en 2.6 millones de hectáreas adicionales (figura 2.2) [69].

Maíz. El maíz es uno de los dos cultivos más importantes para la producción de etanol en el mundo. El maíz es el cultivo alimenticio más importante en México, con un aproximado de 7.8 millones de hectáreas (figuras 2.3 y 2.4).

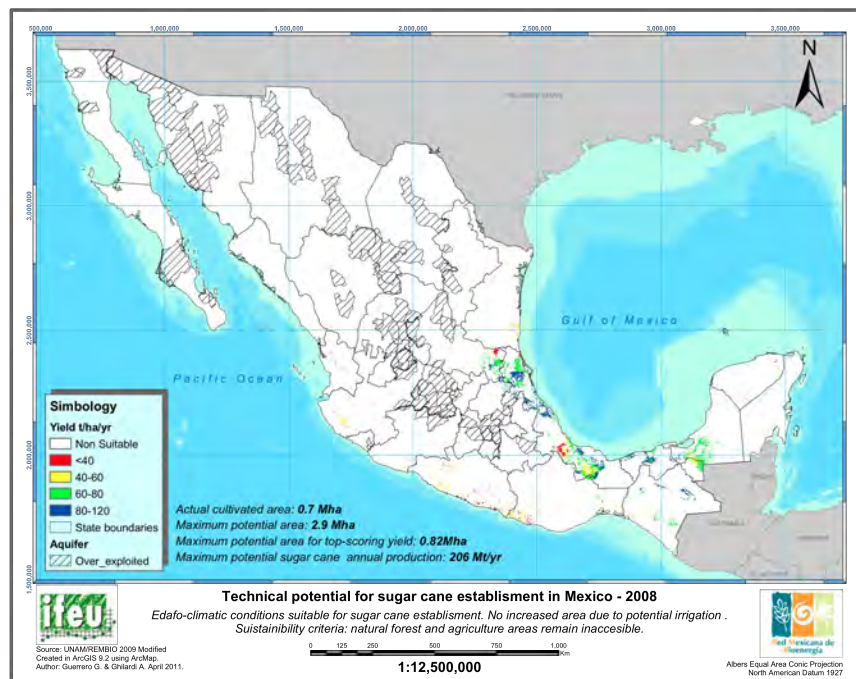


Figura 2.1 Área potencial de cultivo de caña de azúcar. [Gabriela Guerrero, comunicación personal].



Figura 2.2 Área potencial de cultivo de sorgo grano. Fuente: [Gabriela Guerrero, comunicación personal].

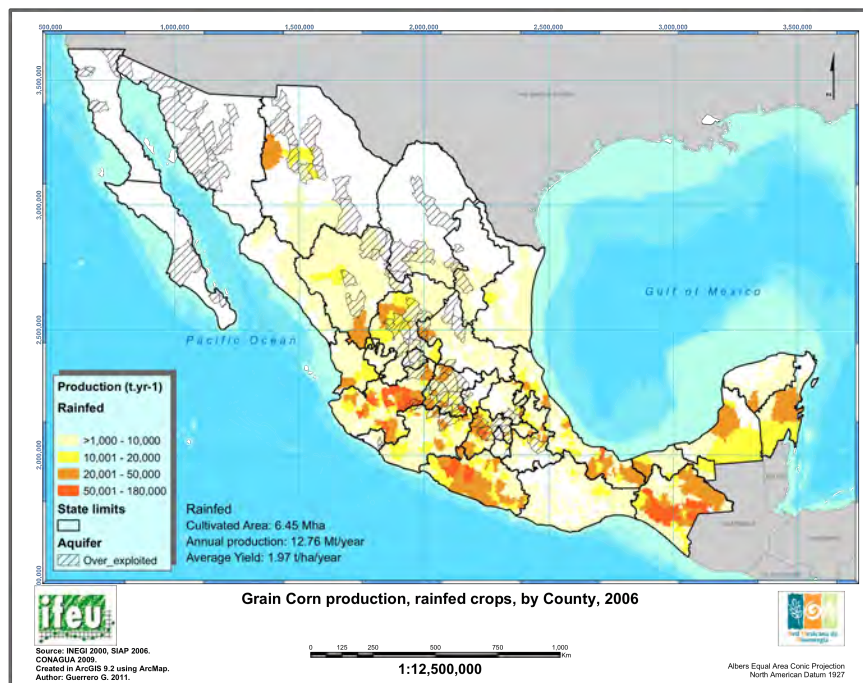


Figura 2.3 Cultivos de maíz (temporal). Fuente: [Gabriela Guerrero, comunicación personal].

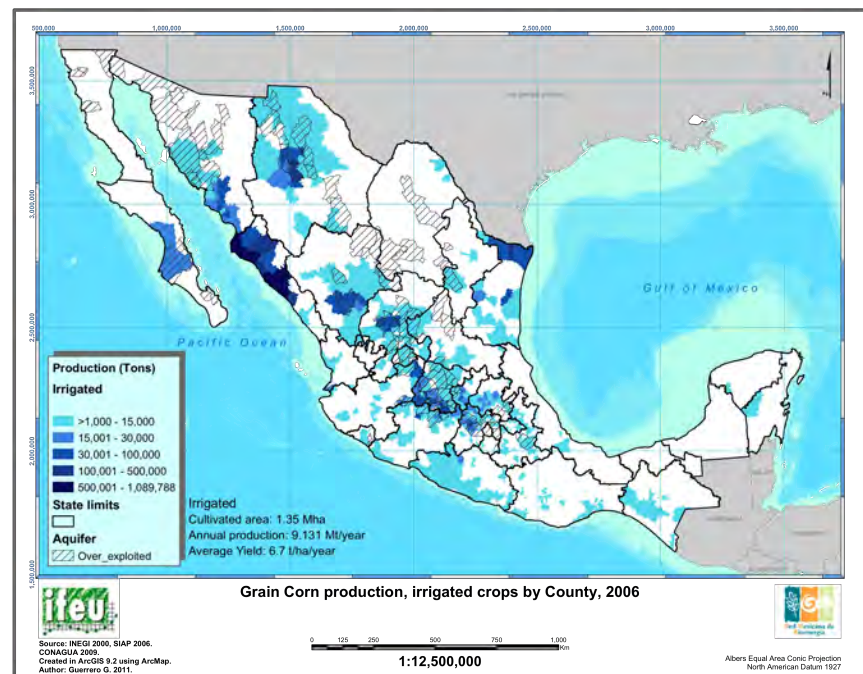


Figura 2.4 Cultivos de maíz (riego). Fuente: [Gabriela Guerrero, comunicación personal]

Estudios sobre la posibilidad de producción de etanol en México señalan a las tecnologías tradicionales como las más factibles para iniciar la producción de etanol [86], por tal motivo se considera la tecnología de producción de etanol a partir de caña, concretamente a partir de miel B, melaza y jugo directo; mientras que la tecnología de producción de etanol por molienda seca se aplica para las producción de etanol a partir de maíz y sorgo grano.

En cuanto a la producción a partir de caña de azúcar, el etanol se puede producir directamente a partir del jugo o guarapo de caña, o a partir de alguna de las mieles derivadas del proceso de fabricación de azúcar. El proceso de producción de azúcar se inicia con la molienda de la caña para extraer el jugo, que luego es clarificado y concentrado. Sobre el jugo concentrado se realizan hasta tres sucesivas cristalizaciones, seguidas por la separación de los cristales de sacarosa y la miel mediante centrifugación. De la primera etapa de cristalización y centrifugación se obtiene el azúcar A y la miel A, de la segunda resultan el azúcar B y miel B, y de la tercera el azúcar C y la miel C o melaza, de la cual no se recupera industrialmente más sacarosa pero que contiene un 50% de material fermentable [86]. La melaza puede ser fermentada usando levaduras, y el vino así obtenido se destila para obtener etanol. Otra modalidad que permite destinar mayor cantidad de mieles para la fermentación a etanol en caso de que así se requiera, es la producción a partir de miel B. La diferencia radica en que se produce solamente el azúcar de las cristalizaciones A y B, lo que permite desviar la miel B para la producción de etanol, con una consecuente menor producción de azúcar y mayor producción de etanol.

Existe además otra modalidad, que no implica la producción de azúcar, y se practica en las destilerías autónomas. En este proceso se extrae el jugo de la caña, que es tratado, concentrado, fermentado y destilado para obtener etanol de 96%.

En todos los casos anteriores es necesario un proceso extra de deshidratación del etanol para poder ser mezclado con las gasolinas.

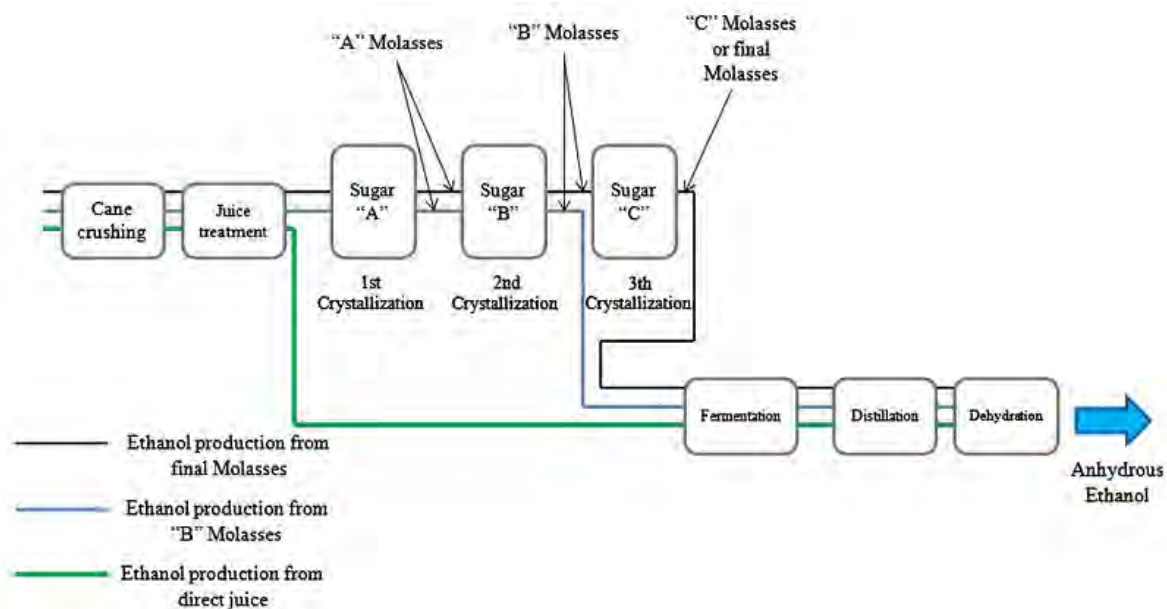


Figura 2.5. Procesos industriales para la producción de etanol a partir de caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando lo anterior las modalidades analizadas de producción de etanol de caña para la producción de etanol en México son cinco, las cuales se describen a continuación y se resumen en la Tabla 2.3.

Etanol de Melazas finales con bagazo y combustóleo como combustibles (EMF). En esta modalidad se consideró un rendimiento medio de la producción de caña de azúcar en el campo con sus correspondientes insumos agrícolas. El proceso incluye la producción de azúcares A, B, C y etanol a partir de miel final o melaza. En la etapa industrial en las calderas se usa combustóleo suplementario al bagazo para suministrar el vapor de proceso necesario en la producción de azúcar, y una parte de la electricidad del proceso proveniente de la red eléctrica nacional. Esta modalidad corresponde a la manera en que operan actualmente alrededor de 38 ingenios en México [66], donde no se ha logrado la autosuficiencia energética de las plantas y el consumo de combustóleo varía desde los 22L/t caña hasta menos de 1L/t caña. Para la producción de etanol se asume la anexión de una destilería donde el combustóleo es el único combustible para generación de calor de proceso.

Etanol a partir de Miel B (EMBF). En esta modalidad se considera también un rendimiento medio de la producción de caña de azúcar en el campo. El proceso incluye la producción de azúcares A y B y etanol a partir de miel B. Las calderas requieren del uso de combustóleo suplementario al bagazo para suministrar el vapor de proceso necesario en la producción de azúcar, así como la compra de electricidad de la red eléctrica nacional. Al igual que en la modalidad anterior se asume hipotéticamente la anexión de una destilería, que usa combustóleo como único combustible.

Etanol de Melazas sin combustóleo (EMB). En este escenario se considera un rendimiento alto de caña de azúcar en el campo. El proceso incluye la producción de azúcares A, B, C y etanol a partir de la miel final o melaza. En las calderas se utiliza exclusivamente bagazo para suministrar el vapor de proceso necesario para la producción de azúcar y para la destilería, situación que ocurre en alrededor de 17 ingenios en México [66]. Se compra a la red eléctrica nacional una parte de la electricidad del proceso. Esta modalidad corresponde a un caso existente en México por lo que no contiene ningún elemento hipotético, sin embargo el alcohol producido no tiene un uso como carburante. Implica que se produzcan y almacenen excedentes de bagazo durante la zafra, para operar la destilería durante todo el año.

Etanol de Jugo Directo sin créditos por electricidad (EJD). En esta modalidad se considera un rendimiento en campo alto. Se asume la operación de una destilería autónoma, es decir, que el único producto es etanol, y que el proceso opera enteramente con la energía suministrada con el bagazo, sin ningún excedente de energía. Este es un caso hipotético, donde se estimaron las entradas y salidas de la etapa industrial con referencias de plantas brasileñas.

Etanol de Jugo directo con créditos por electricidad (EJDE). Se considera la producción al igual que en la modalidad EJD, con la diferencia de que en este caso se asume un excedente de electricidad, que es exportado a la red del sistema eléctrico nacional.



Tabla 2.3 Modalidades de producción de etanol con posibilidades de aplicación en México.

Modalidad	Rendimiento		Producción de azúcar (kg/t caña)	Energía en producción de azúcar	Energía para Destilería	Energía para Electricidad de la Red Eléctrica Nacional	Producción etanol (L/t caña)
	Campo (t/ha)	Etanol a partir de					
EMF	70*	Melaza	112*	Bagazo + Comb	+ Combustóleo	Importación	8.8**
EMBF	70*	Miel B	92*	Bagazo + Comb	+ Combustóleo	Importación	17.1**
EMB	70*	Melaza	120*	Bagazo	Bagazo	Importación	8.8**
EDJ	70*	Jugo Directo	-	-	Bagazo	Exportación	83.17***
EDJE	70+	Jugo Directo	-	-	Bagazo	Exportación	83.17***

\*Datos de campo; \*\*[86];\*\*\*[87]

Las modalidades para maíz y sorgo grano sólo varían en la manera de la producción agrícola (tabla 2.4), ya que se asume la misma tecnología de producción industrial, la cual corresponde a producción de etanol por molienda seca.

El proceso inicia (figura 2.6) con la molienda del maíz o el sorgo, posteriormente se adiciona agua purificada y se realiza un cocinado para después realizar una hidrólisis para liberar los azúcares en el maíz y el sorgo. Los azúcares son entonces fermentados, donde el producto de la fermentación es destilado, de donde se obtiene etanol hidratado, el cual es posteriormente deshidratado por medio de mallas moleculares. Finalmente al etanol se le adiciona gasolina para desnaturalizarlo. De la fermentación también se obtiene una vinaza la cual es centrifugada para separar la fracción sólida, la cual es posteriormente secada, obteniéndose los Granos Secos de la Destilación con Solubles (GSDCS), el cual es el co-producto del proceso.

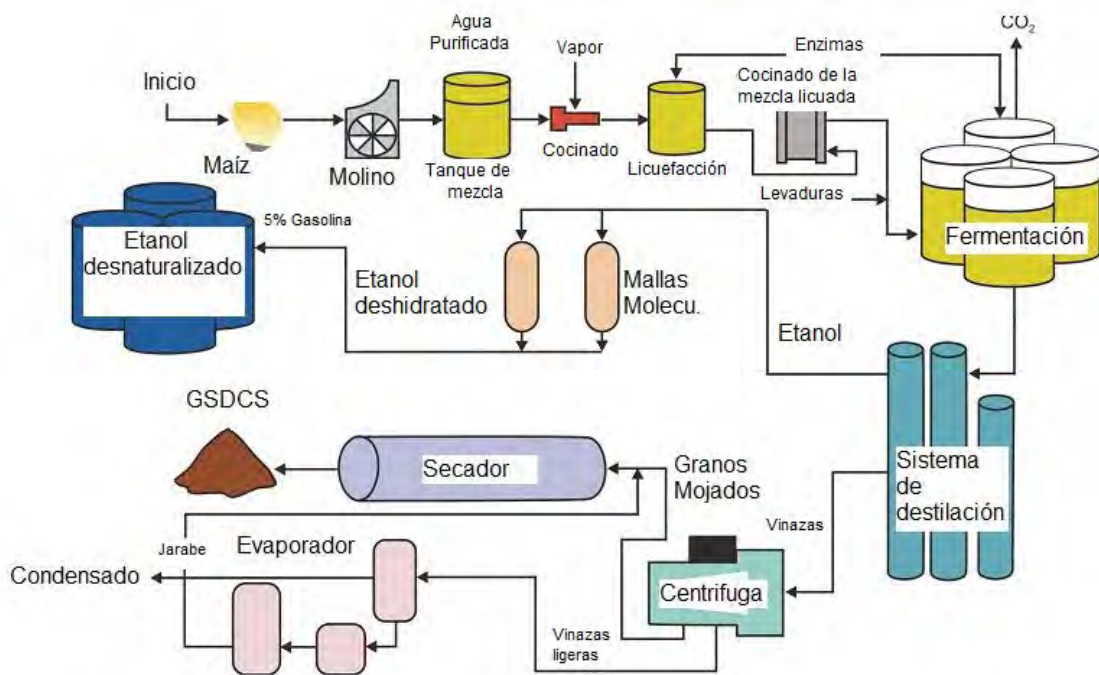


Figura 2.6 Proceso de producción de etanol a partir de maíz y sorgo [88]

Tabla 2.4 Modalidades de producción de etanol a partir de maíz y sorgo grano.

Modalidad	Rendimiento en campo (t/ha)	Materia prima del etanol	Combustible de la etapa industrial	Origen de la Electricidad	Producción en fábrica (L/t grano)	Co-producto (GSDCC) (kg/t grano)
Sorgo Medio	2.5*	Grano	Combustóleo(50%)/Gas Natural(50%)	SEN	434**	447**
Sorgo Alto	4.5*	Grano	Combustóleo(50%)/Gas Natural(50%)	SEN	434**	447**
Maíz Bajo	1*	Grano	Combustóleo(50%)/Gas Natural(50%)	SEN	434**	447**
Maíz Medio	5*	Grano	Combustóleo(50%)/Gas Natural(50%)	SEN	434**	447**
Maíz Alto	9*	Grano	Combustóleo(50%)/Gas Natural(50%)	SEN	434**	447**

SEN: Sistema eléctrico Nacional; \* [89], \*\*Base de datos IFEU.

## 2.2.2 Selección de indicadores de sustentabilidad

Los indicadores de sustentabilidad seleccionados tratan directamente las cuestiones más controvertidas sobre los biocombustibles, y son los que aparecen con mayor recurrencia en las evaluaciones socio-económicas y ambientales de la producción de biocombustibles (ver Capítulo 1).

En todos los indicadores se trató de mantener una perspectiva de ciclo de vida, a excepción del indicador de uso de suelo debido a una ausencia de información en la literatura.

### 2.2.2.1 Indicador energético ( $I_e$ )

El balance energético nos da una indicación del grado de renovabilidad del etanol producido, ya que nos dice la energía fósil que es necesario emplear para producir una unidad de energía renovable, en este caso etanol. De esta forma a menor requerimiento de energía fósil por unidad de etanol estaremos hablando de un combustible con un mayor grado de renovabilidad. El balance energético ha sido uno de los aspectos en los que se ha centrado la discusión sobre la conveniencia y la sustentabilidad del etanol, teniéndose una gran cantidad de estudios con igual número de resultados.

### 2.2.2.2 Indicador ambiental ( $I_a$ )

Uno de los argumentos para la introducción de bioenergía en lugar de los combustibles fósiles es que reduce las emisiones de GEI. Por tal motivo, la evaluación de las emisiones de GEI es un indicador que se repite en todos los estándares de certificación de sustentabilidad y en los estudios científicos (ver Capítulo 1). De esta manera este es el segundo indicador propuesto, el cual corresponde a la dimensión ambiental de la sustentabilidad.

### 2.2.2.3 Indicador consumo de agua ( $I_{ua}$ )

Con el propósito de empezar a entender cómo la producción de biocombustibles podría afectar los recursos de agua fresca (ríos, lagos y acuíferos), en principio es necesario cuantificar el volumen de agua para la producción de etanol [80].

Este trabajo se evaluó el consumo de agua para la producción de etanol en distintas modalidades de producción de etanol, este indicador se expresa en unidades de volumen de agua requerida por unidad de energía del etanol según su poder calorífico inferior ( $\text{m}^3/\text{GJ}$ ).

#### 2.2.2.4 Indicador uso de suelo ( $I_{us}$ )

Debido a la dificultad que presenta establecer acuerdos en cuanto a las metodologías para evaluar las emisiones de  $\text{CO}_2$  debido a el uso indirecto en el uso de suelo, comentado ya en el Capítulo 3, así como otras cuestiones como el aumento de la demanda de tierras para la producción de alimentos, la producción de etanol (y de biocombustibles en general), es importante evaluar factores como la eficiencia del área, que es la cantidad de etanol que puede ser producido a partir de cierta área de cultivo [90]. En este trabajo evaluamos el indicador de uso de suelo para las modalidades de producción de etanol y las materias primas evaluadas en el capítulo anterior, mismo que se reporta por número de hectáreas cultivadas necesarias para obtener una unidad de energía ( $\text{ha}/\text{GJ}$ ).

#### 2.2.2.5 Indicador económico ( $I_{ec}$ )

El costo económico y particularmente los estudios de costo beneficio (CB) han sido una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación de todo tipo de proyectos energéticos, siendo estos resultados una fuente de información muy importante para la toma de decisiones. Con el objeto de cubrir la dimensión económica de la sustentabilidad se propone la evaluación del indicador de costo económico por unidad de etanol, mismo que fue propuesto por Afgan [12] para la evaluación de sistemas energéticos, y que fue propuesto también por separado como una herramienta para poner en práctica el concepto de sustentabilidad en la elaboración de productos bajo la metodología para el Análisis de Ciclo de Vida [91]. Este indicador se expresa en unidades monetarias por unidad de volumen de etanol ( $\text{USD}/\text{L}$ ).

#### 2.2.2.6 Indicador Social ( $I_s$ )

Existe un gran número de criterios de sustentabilidad que se enmarcan en la dimensión social, sin embargo, a pesar de que la evaluación de estos indicadores es difícil, debido a la

gran cantidad de datos necesarios para su estimación, en este caso se propone la evaluación del indicador de los nuevos empleos remunerados por unidad de volumen de etanol producido. Es importante mencionar que este mismo indicador también ha sido propuesto por otros autores para incluir aspectos sociales en el Análisis de Ciclo de Vida y así realizar evaluaciones de sustentabilidad del CV de cualquier producto [92]. También existe la propuesta de incluirlo en el estándar ISO 14000 [92].

#### 2.2.3.1 Balance de emisiones GEI y balance energético

Para efectuar el estudio de Ciclo de Vida de las cinco modalidades descritas para la producción de etanol en México se utilizó la metodología recomendada en la Directiva Europea de Energías Renovables [61]. Para la aplicación de esta metodología se requirió primero una definición de las fronteras del sistema, posteriormente se procedió a la realización del inventario de entradas y salidas del sistema en una base de datos propia, para lo cual se recopilaron datos de campo en su gran mayoría y algunos datos de la literatura para la etapa industrial. Posteriormente se realizó el cálculo de las emisiones de GEI y balance energético utilizando un modelo modificado para tal propósito. Las asignaciones de emisiones y energía se calcularon utilizando el método de contenido energético en los casos con producción de azúcar y etanol, mientras que en los casos de la producción de etanol en destilerías autónomas se asignaron créditos de emisiones debido a los excedentes de electricidad generada en el proceso. Finalmente se realizó el cálculo de las emisiones debidas al cambio en el uso de suelo para las diferentes modalidades de producción con el propósito de explorar los efectos en el caso de expansión de los cultivos en áreas propicias. Se realizó además el cálculo de la producción de etanol en Brasil con los datos reportados por Macedo [87] y aplicando la misma metodología de la Directiva Europea, con el propósito de comparación de resultados bajo las mismas fronteras del sistema y los mismos factores de emisión.

#### 2.2.3.2 Definición de las fronteras del sistema

Las fronteras del sistema definen qué procesos están incluidos en el análisis y cuales no. El sistema comprende la producción agrícola, el transporte de la caña a la planta de etanol, la

producción industrial y el transporte a la planta de mezclado. En la producción agrícola se consideran las emisiones por la volatilización de los fertilizantes nitrogenados, las emisiones y energía por la producción de fertilizantes, las emisiones y energía por la producción de pesticidas, las emisiones y energía por el riego, las emisiones y energía de los motores para la maquinaria agrícola alimentados con combustibles fósiles y las emisiones por la quema de los residuos de la caña en la cosecha. En la producción industrial se consideran las emisiones y la energía de las calderas que producen el vapor utilizado en el proceso y las emisiones y energía provenientes del uso y generación de electricidad. Para los transportes se consideran las emisiones y la energía por los combustibles usados en los vehículos de transporte. Además se exploró el efecto de una posible expansión del cultivo de la caña en tierras con diferentes coberturas vegetales, es decir, se estimaron las emisiones por el cambio directo en el uso de suelo. Los GEI considerados en todas las etapas son el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, con potenciales de calentamiento de 1, 23 y 296 respectivamente [93]. Las emisiones totales de cada etapa están expresadas en kgCO<sub>2</sub>e/GJ etanol, mientras que el consumo de energía primaria fósil está expresado en GJ fósil/GJ etanol.

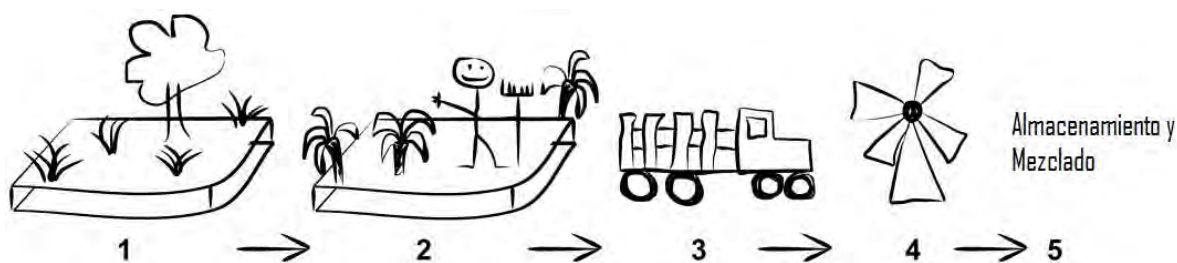


Figura 2.7 Fronteras del sistema: 1) Cambio de uso de suelo directo, 2) Cultivo, 3) Transporte de materia prima, 4) Proceso industrial de producción de etanol, 5) Distribución a almacenamiento y mezclado. Fuente: IFEU.

Las emisiones y la energía asociadas a la construcción de la maquinaria, equipos e instalaciones, labor humana, transporte de semillas/plantas, transporte de fertilizantes y pesticidas, no se incluyen en la directiva europea y por esta razón no las consideramos.

#### 2.2.3.3 Modelo empleado para el ACV

Para el estudio de ciclo de vida de la energía y emisiones de GEI de diferentes procesos y cultivos para la producción de etanol, con el fin de encontrar el modelo más acorde con los objetivos del estudio se estudiaron cinco modelos.

*EBAMM* “*Energy and Resource Group Biofuel Analysis Meta-Model*” (*EBAMM*): o Meta Modelo para el Análisis de Biocombustibles del Grupo de Energía y Recursos, desarrollado por la Universidad de California, Berkeley [94]. El modelo fue construido para poder homogeneizar diferentes estudios de balance energético y de GEI de manera que puedan ser comparables entre sí, ya que los estudios en principio pueden tener definidas diferentes fronteras del sistema, diferentes unidades y diferentes supuestos. El modelo calcula el Balance Energético Neto (BEN) restando a la energía de salida la energía de entrada. El modelo está calibrado con los datos de producción de maíz en Estados Unidos.

*California GREET (CA-GREET)* [95]: Es la modificación del modelo GREET que fue desarrollado para estimar balances de emisiones GEI y de otros gases durante el ciclo de vida de la producción de combustibles fósiles y de combustibles alternativos. El modelo CA-GREET incorpora modificaciones para aplicarse al caso específico de California, y es la herramienta con la que se evalúa la mitigación de los combustibles alternativos bajo el programa *Californian Low Carbon Fuel Standard*, el cual pretende disminuir las emisiones de GEI en un 10% en 2020 en el sector transporte de California.

*Calculador de RTFO* [96]: Es la herramienta del Reino Unido para reportar las emisiones de GEI de la producción de combustibles alternativos bajo lo que se conoce como Renewable Transport Fuels Obligation (RTFO), el cual requiere que cierto porcentaje de los combustibles que se venden para el sector transporte (2.5% en 2008/2009) provengan de combustibles renovables. Este programa hasta el momento es sólo para reporte y no se establece ninguna obligación de mitigación.

*Calculador de SenterNovem*<sup>5</sup>: Es un calculador desarrollado a petición de una agencia Holandesa, el calculador aplica la metodología adoptada por la Unión Europea para calcular la mitigación de emisiones de GEI.

El último *modelo fue desarrollado por el Instituto de Energía y Ambiente (IFEU)* de Heidelberg en Alemania. El modelo fue desarrollado para el cálculo de GEI de biocombustibles en el ciclo de vida. Este modelo resultó ser el que guardó mayor concordancia con la metodología propuesta para este proyecto además de contar con una base de datos amplia sobre varios procesos de producción de etanol, por lo que fue elegido como apoyo para la realización de este estudio de ciclo de vida. A este modelo IFEU se le agregaron módulos para el cálculo de balance de energía total y para el balance de energía fósil.

#### 2.2.3.4 Datos

Los datos originales para el estudio se obtuvieron durante las visitas al ingenio azucarero “Motzorongo” y al ingenio y destilería “La Gloria”, ambos en el estado de Veracruz. En cada uno de los ingenios se entrevistó y se realizaron encuestas a productores de caña, trabajadores rurales, operarios, técnicos e ingenieros de fábrica, camioneros y directivos. Los datos de insumos para producción agrícola y de carga y transporte de campo a fábrica fueron recolectados en estas visitas. Las emisiones por la volatilización de nitrógeno al ser aplicado en fertilizantes se estimaron según lo recomendado por el IPCC [97]. La mayoría de los datos de la producción industrial fueron tomados de estas mismas visitas y los restantes fueron tomados de la literatura. Los datos para el transporte a las estaciones de mezclado fueron estimados tomando en cuenta las distancias promedio a las estaciones de almacenamiento y mezclado que existen en el país. Los datos de insumos, rendimientos y servicios necesarios para la producción de etanol de caña se presentan en la tabla 2.5, mientras que para los casos de maíz y sorgo se presentan en la tabla 2.6.

---

<sup>5</sup> Originalmente el calculador fue desarrollado por Senter Novem, y estaba disponible en su página de Internet. Senter Novem pasó a formar parte de el Ministerio de Asuntos Economicos, Agricultura e Innovación del gobierno de Holanda en 2010. Al momento de redactar esta tesis ya no existe la liga al calculador.



Tabla 2.5 Datos para el cálculo de los ACV. Datos de campo salvo que se indique lo contrario.

	EMF	EMBF	EMB	EDJ	EDJE	Brasil EDJE*
<b>Cultivo</b>						
Nitrógeno (kg/ha*año)	126	126	126	126	126	80 $\beta$
Fósforo P2O5 (kg/ha*año)	42	42	42	42	42	45 $\beta$
Potasio K2O (kg/ha*año)	150	150	150	150	150	114.6 $\beta$
Cal (kg/ha*año)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	1,900
Pesticidas (kg/h*año)	2	2	2	2	2	2
Diesel (kg/ha*año)	109	109	109	109	19	164
Riego (MJ/ha*año)	-	-	-	-	-	-
Rendimiento (t caña/ha*año)	70	70	70	70	70	87.1
<b>Fase Industrial</b>						
Combustóleo (kg/t caña)	10.7**	7.4**	-	-	-	-
Compra de electricidad (kWh/t caña)	7.64 $\alpha$	9.0 $\alpha$	7.64	-	-	-
Excedente de electricidad (kWh/t caña)	-	-	-	-	8.8***	9.2 $\infty$
Rendimiento en fabrica (L etanol/t caña)	8.8	17.1	8.8	83.2***	83.2***	86.3
<b>Transporte</b>						
Transporte de biomasa (km, viaje redondo)	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	46
Transporte a mezclado (km)	300	300	300	300	300	300 $\mu$

\*Datos tomados para la zafra 2005/2006 de Macedo [87]; \*\*[95];  $\alpha$  Supuestos basados en SENER[86] y en cálculo propios;  $\beta$  Promedio de lo reportado por Macedo;  $\infty$ Electricidad mix para Brasil 180 gCO<sub>2</sub>e/kWh [87];  $\mu$  Supuesto mismo recorrido que en México; \*\*\* Datos calculados basados en las condiciones de México y en los datos típicos para Brasil.

Para estimar las emisiones de GEI por uso de la energía eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se calculó un factor de emisión promedio con información del Balance Nacional de Energía [98]. Se construyó una matriz con las diferentes aportaciones de energía de cada tecnología y se calcularon las emisiones de cada una de ellas utilizando los factores de emisión recomendados por el IPCC [99] obteniendo un promedio de 498 gCO<sub>2</sub>e/kWh.

Tabla 2.6 Datos de insumos, rendimientos y servicios necesarios para el ACV.

	Sorgo Medio	Sorgo Alto	Maíz Bajo	Maíz Medio	Maíz Alto
<i>Cultivo</i>					
Nitrógeno (kg/ha*año)	0*	189*	0*	210*	273*
Fosfato (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; kg/ha*año)	0*	70*	0*	0*	161*
Óxido de potasio (K <sub>2</sub> O; kg/ha*año)	0*	0*	0*	0*	0*
Pesticidas (kg/ha*año )	3.2*	1.4*	2*	7*	10*
Diesel (kg/ha*yr)	104 <sup>u</sup>	131 <sup>u</sup>	53 <sup>u</sup>	116 <sup>u</sup>	147 <sup>u</sup>
Riego (MJ/ha*yr)	-	2,680 <sup>u</sup>	-	Por gravedad	Por gravedad
Rendimiento (t grano /ha*año)	2.5 <sup>u</sup>	4.5 <sup>u</sup>	1 <sup>u</sup>	5 <sup>u</sup>	9 <sup>u</sup>
<i>Etapa Industrial</i>					
Combustóleo (MJ/L etanol)	9.4**	9.4**	9.4**	9.4**	9.4**
Gas Natural (MJ/L etanol)	9.4**	9.4**	9.4**	9.4**	9.4**
Electricidad (kWh/L etanol)	0.3**	0.3**	0.3**	0.3**	0.3**
Rendimiento Fábrica (L etanol/t grano)	434**	434**	434**	434**	434**
<i>Transporte</i>					
Transporte de grano (km, viaje redondo)	100 <sup>s</sup>	100 <sup>s</sup>	100 <sup>s</sup>	100 <sup>s</sup>	100 <sup>s</sup>
Transporte a mezclado (km)	300 <sup>s</sup>	300 <sup>s</sup>	300 <sup>s</sup>	300 <sup>s</sup>	300 <sup>s</sup>

\*SAGARPA, SIAP-VIOCs. [89], <sup>u</sup>Cálculos propios basados en [89], \*\*Base de datos de IFEU, <sup>s</sup> Supuestos

Además, se calculó la eficiencia energética promedio del sistema de generación nacional, como la media ponderada de las eficiencias de cada fuente. La eficiencia promedio calculada fue de 39.5%, y la de las plantas eléctricas con energía fósil fue de 40.7%, dato que fue empleado para el cálculo de la demanda de energía fósil en la generación eléctrica.

#### 2.2.3.5 Unidad Funcional

La unidad funcional es una medida del desempeño del sistema analizado. Es importante porque permite comparar diferentes productos y sistemas de producción, reconociendo que las diferentes opciones deben ser comparadas en base al servicio que proveen [100]. En esta tesis se utilizó  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$  para las emisiones GEI, mientras que para el balance energético utilizamos  $\text{GJ}_{\text{etanol}}/\text{GJ}_{\text{fósil}}$ .

#### 2.2.3.6 Supuestos sobre el cambio en el uso de suelo

La producción de biocombustibles, y de etanol en particular, se inicia con el establecimiento de la plantación. El cambio en el uso de suelo provoca un cambio en los almacenes de carbono en la vegetación y el suelo. Las emisiones por el Cambio en el Uso de suelo Directo (CUSd) son las debidas a las variaciones de almacenes de carbono en la biomasa aérea (la que sobresale de la superficie), la biomasa subterránea (rizomas y raíces) y el carbono orgánico en el suelo; en esta metodología se supone que todo el carbono perdido con el cambio de uso de suelo se transformará en  $\text{CO}_2$ . Estas emisiones tienen una influencia negativa en los balances de GEI cuando se cultivan áreas con un alto contenido de carbono almacenado, como en los bosques, resultando en balances negativos de  $\text{CO}_2$  para el etanol [81,82].

Para cada una de las modalidades de producción aplicables en México se han evaluado los impactos de la posible expansión del cultivo sobre diferentes coberturas vegetales que existen en áreas geográficas donde podría desarrollarse el cultivo de caña. No se ha considerado la expansión sobre terrenos degradados debido a que los sistemas de producción estudiados son de rendimientos medios y altos, mismos que no podrían lograrse en suelos degradados sin realizar previamente inversiones en sistematización, recuperación de suelos químicamente degradados e irrigación.

Tabla 2.7 Valores de C para los calculo de emisiones de CO<sub>2</sub> por el cambio directo en el uso de suelo.

		Pastizal	Selva baja	Selva alta
Uso previo				
Biomasa total	t C/ha	95.4	89.3	148.6
Biomasa sobre+bajo el suelo	t C/ha	34.2	21.6	50.5
Suelo	t C/ha	61.2	67.7	98.1
Cultivo				
		Caña	Maíz	Sorgo
Biomasa total	t C/ha	69.4	61.3	59.9
Biomasa sobre+bajo el suelo	t C/ha	12.6	4.5	3.1
Suelo	t C/ha	56.8	56.8	56.8

Fuente: Cálculos propios en base a [101].

Los valores de biomasa aérea se estiman considerando la cubierta vegetal del suelo. Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) [101] los principales tipos de vegetación en México son: pastizales naturales, selva baja, selva mediana y alta, bosques templados de coníferas y latifoliadas, matorrales, y áreas de cultivo (tabla 2.7). Se utilizaron los valores promedio del contenido de carbono (tC/ha) de la parte aérea y subterránea reportados por INEGEI para todos ellos. Los datos de carbono en suelo se obtuvieron de la misma fuente; aunque tienen una incertidumbre alta, son las mejores estimaciones disponibles para México. Las emisiones se amortizaron en un período de 20 años [61].

Existen otras emisiones, las debidas al cambio indirecto en el uso de suelo, que ocurren cuando la expansión del área de cultivo para la producción de biocombustibles tiene como resultado el desplazamiento de cultivos o pastos sobre áreas que no eran cultivadas previamente. Estas emisiones indirectas no pueden ser atribuidas individualmente a procesos de producción específicos ya que dependen de la demanda del mercado, de los precios y de la disponibilidad de productos sustitutos. Este es un fenómeno complejo que

no ha sido entendido aún del todo por la comunidad científica, por lo que no se incluyen aun en las metodologías y por lo cual estas emisiones no están incluidas en este trabajo.

#### 2.2.3.7 Asignación (Allocation)

En los procesos de producción de biocombustibles hay casos en donde se obtiene además del etanol o biodiesel uno o varios co-productos, por lo que se hace necesario decidir qué cantidad de emisiones y de energía se asignan a esos co-productos. A esta asignación de energía y/o emisiones se le llama “allocation”. Existen tres formas principales de allocation, una basada en precios, otro basado en categorías físicas, y la última por sustitución de productos.

La primera forma de asignación está basada en precios de mercado de los productos y co-productos y se basa en la lógica de que los precios guían a la producción. Una de las desventajas de este método ha sido ya señalada por [102, 103]; debido a que los precios no son constantes en el tiempo, las emisiones asignadas a los biocombustibles están al final fuertemente definidas por variaciones en los mercados y precios de los co-productos, además de que la existencia de subsidios puede distorsionar los precios relativos [103].

Los métodos de asignación por categorías físicas se dividen en la asignación por masa y por contenido energético. El primer método distribuye las emisiones en proporción a las masas del biocombustible y de los co-productos del proceso, y el segundo en relación a sus contenidos energéticos. Este es el adoptado por la Directiva Europea de Energía Renovable, y al igual que el de asignación por masa tiene la ventaja que el contenido calórico es constante, fácil de determinar y da resultados comparables al del método de sustitución. Una posible desventaja de este método es que no parece ser el más apropiado cuando se tiene un co-producto con un alto contenido energético pero un bajo valor de mercado.

En el método de sustitución o de expansión del sistema se considera que el biocombustible es el único producto, pero se le restan las emisiones debidas al producto que fue sustituido por el co-producto. El estándar ISO recomienda este ultimo método en lugar de los otros anteriores [104], sin embargo es difícil llevarlo a la práctica en muchos casos debido a que hay veces en que el co-producto puede ser utilizado en más de una manera, lo que

implicaría que puede sustituir más de un producto, lo cual dificulta definir cuál es el producto que sería más viable sustituir. Además, es posible que al momento no existan datos de las emisiones en energía y emisiones en el ciclo de vida del producto a sustituir.

En este trabajo se realizaron cálculos utilizando la asignación por contenido energético de etanol y co-productos. Se emplearon los PCI de 26.8 MJ/kg para el etanol y 16.5 MJ/kg para el azúcar. En los casos EDJE se utilizó el método de expansión del sistema bebido a que se conoce la emisión específica de GEI de la electricidad desplazada de la red.

#### 2.2.4 Indicador de consumo de agua

El consumo de agua en la producción de etanol es uno de los aspectos de la sustentabilidad de biocombustibles que han sido menos explorados, a diferencia de los balances de energía y de las emisiones de GEI. Sin embargo, ha habido intentos de evaluar el consumo de agua en el ciclo de vida. Estos intentos se han dado principalmente como la Huella Hídrica (HH), desarrollado por Hoekstra y Champagain [82], y empleados también por Dominguez-Faus et al [105]. La HH se define como el volumen de agua fresca usada para la producción de un bien en el lugar específico donde fue producido. Para el caso de los biocombustibles, en general, la HH incluye la llamada agua verde, agua azul y agua gris. El agua verde se refiere a toda el agua de lluvia que es evaporada y transpirada (evapotranspirada) durante el crecimiento del cultivo del que se esté produciendo el etanol u otro biocombustible. El agua azul se refiere al agua superficial (ríos y lagos) y al agua subterránea que es utilizada para irrigación del cultivo y para el procesamiento en las fábricas. El agua gris se refiere al agua necesaria para diluir los contaminantes de los procesos industriales a niveles que no representan un daño para el ambiente. El agua azul y el agua verde se encuentran presentes en todos los trabajos revisados de consumo de agua en la producción de biocombustibles, por lo que en este trabajo se decidió usar el consumo de agua como el consumo de agua azul y agua verde tal y como se usa en el trabajo de Fingerman et al [81]. Esto implica el uso por la combinación de evaporación y transpiración de la planta (evapotranspiración) y el agua utilizada en la etapa industrial. El agua gris no fue analizada en este trabajo.

Para el cálculo del agua verde se requirió el cálculo de la evapotranspiración y del conocimiento de la precipitación pluvial promedio anual. La evapotranspiración fue calculada usando el software desarrollado por la FAO llamado CROPWAT [106], usando datos de las estaciones meteorológicas de la FAO reportados en CLIMWAT [107]. También se requirió la compilación de datos meteorológicos de otras fuentes [108-110]. El déficit de agua de lluvia es el agua azul, la cual debe contabilizarse en la producción agrícola con riego, donde asumimos una eficiencia de riego del 100%.

Los datos del consumo de agua de las etapas industriales fueron tomados de Moreira [111], reportados originalmente como  $21 \text{ m}^3/\text{tcaña}$ , y Wu et al [112], que corresponde a  $6 \text{ L}_{\text{agua}}/\text{L}_{\text{etanol}}$  (para maíz, y suponiendo el mismo consumo para sorgo grano).

Los casos en donde existe un co-producto, al igual que en el  $I_e$  y  $I_a$ , se realizó una asignación del uso de agua por el método de contenido energético, para ser consistente con la metodología utilizada para otros indicadores. El indicador de consumo de agua propuesto se expresa en unidades de volumen por el contenido energético unitario de etanol anhidro ( $\text{m}^3/\text{GJ}$ ).

Los datos se presentan en el Anexo A.

#### 2.2.5 Indicador uso de suelo

Este indicador se calcula como el producto de los rendimientos en campo de la materia prima por el rendimiento de la producción industrial. Se expresa en unidades de superficie por unidad energética ( $\text{ha}/\text{GJ}$ ).

#### 2.2.6 Indicador económico

Para el cálculo del indicador económico se calcularon los costos de producción de cada uno de los escenarios propuestos utilizando la técnica del Valor Presente Neto. Se consideraron los costos de producción de la materia prima, costos de transporte de la materia prima; en la etapa industrial se consideraron los costos de inversión, operación y mantenimiento, costos de la energía consumida en los procesos de transformación y los beneficios por la venta de co-productos. Finalmente se contabilizaron los costos por la distribución del

biocombustible. Los datos de costos de producción de la materia prima se obtuvieron de entrevistas y estudios de campo en los ingenios de la Gloria y Motzorongo, ambos en el estado de Veracruz, y también del Sistema de Información Agropecuaria a través del VIOCs [89]. Los costos de los procesamientos industriales así como de los costos de transporte se obtuvieron a partir de datos de la literatura [113-117]. Para el caso de la producción de etanol a partir de jugo directo se consideró una planta con una producción de 17 millones de litros anuales. En los casos de la producción etanol a partir de miel B y miel C se consideraron destilerías con una capacidad de 7.2 millones de litros al año. En las plantas de producción de etanol a partir de maíz y sorgo grano se realizaron los cálculos de costos con plantas con una producción de 150 millones de litros al año. En todos los escenarios se aplicaron tasas de descuento del 10%. Los costos en pesos mexicanos fueron transformados a USD utilizando el COPAR de Generación [117]. Todos los costos fueron transportados y expresados en \$USD 2007 y normalizados a litro de etanol.

Los datos y supuestos para los cálculos se encuentran en el Anexo A.

#### 2.2.7 Indicador social

El indicador social consistió en cuantificar los empleos directos generados en cada uno de los escenarios. Los empleos directos se refieren a los creados durante cada una de las etapas del ciclo de vida: producción de la materia prima, transporte y durante el procesamiento industrial. Para expresar las horas de trabajo como empleos de tiempo completo (en los casos de la producción agrícola y los transportes) se asumió que un empleo de tiempo completo requiere 1800 horas anuales [118]. Los datos de horas de trabajo requeridas para las diferentes actividades fueron las mismas fuentes de los estudios económicos, obtenidos principalmente de las entrevistas de campo, y [69, 113], y se encuentran en el Anexo A.

#### 2.2.8 Agregación de los indicadores en un Índice

Con el propósito de presentar información agregada a los tomadores de decisiones, suele construirse un Índice con los resultados de diferentes indicadores. En este trabajo con el propósito realizar un ejercicio de agregación de los indicadores, realizamos la construcción de un Índice. La agregación de los indicadores se realizó utilizando la conocida ecuación



$$I_{SUS} = \sum_c w_c x_c \dots(1)$$

Donde

$$x_c = \frac{I_c}{I_{oc}} \dots(2)$$

Donde  $I_{SUS}$  es el valor del índice de sustentabilidad que agrupa a los diferentes indicadores. El término  $w$  es la ponderación dada al indicador  $c$  relativo a otros criterios, mientras que  $x$  es el valor normalizado de cada uno de los indicadores para cada uno de los escenarios.  $I$  se refiere al valor de cada indicador  $c$ , en tanto que  $oc$  es valor de referencia o normalización. En nuestro caso  $I_{SUS}$  debe tomar el mayor valor posible para referirnos a los escenarios más sustentables. En los casos donde el mejor desempeño del indicador tiene un sentido de menor valor (como el indicador  $I_{ua}$ ) se utilizaron los valores inversos para la construcción del índice. Para la normalización de los indicadores se utilizaron los valores de las mejores prácticas ya que no es posible definir un valor umbral. En el caso del indicador  $I_a$  el mejor caso corresponde a la producción de etanol en Brasil con 27.5 kgCO<sub>2e</sub>/GJ; en el caso del indicador  $I_e$  el mejor caso también correspondió a la producción de etanol en Brasil con una relación de 8.4; en el caso del indicador  $I_s$  se utilizó el valor obtenido en nuestro trabajo en el caso de la producción de etanol a partir de jugo de caña, el cual contabiliza 9.7 empleos/TJ; en el caso de uso de agua azul (en este caso no contabilizamos el agua verde debido a que no tiene un impacto directo sobre los recursos hídricos que puedan competir con otros usos) el valor correspondió a 3.6 L<sub>agua</sub>/L<sub>etanol</sub> que corresponde a la producción de etanol de maíz y sorgo; en el caso del indicador  $I_{eco}$  el valor bajo el cual se normalizó fue 0.174 USD/L<sup>6</sup> que correspondió al caso de la producción de etanol a partir de sorgo de alto rendimiento; y por último el valor utilizado para la normalización del indicador  $I_{us}$  fue 0.0046 ha/GJ que correspondió al caso de caña de azúcar en Brasil con un muy alto rendimiento en campo.

---

<sup>6</sup> El valor reportado para Brasil es de 0.177 USD/L por lo que fue menor para el caso de sorgo grano con rendimiento alto en México. Los dólares utilizados son constantes del año 2007.

La ponderación de los indicadores tiene una importancia importante en los resultados finales del índice, por lo que no se pueden aplicar ponderaciones arbitrarias. Para ponderar los indicadores se ha realizado un sondeo a investigadores y expertos en el tema.

Los factores de ponderación  $w$  cumplen con lo siguiente

$$\sum_{c=1}^N w_c = 100$$

Los resultados del sondeo se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Ponderación de los indicadores de sustentabilidad por expertos en el tema.

Expertos	Indicadores						Total
	Ia	Ie	Is	Iua	Iec	Ius	
Fabio Manzini (CIE-UNAM)	25	10	20	15	20	10	
Jorge Islas (CIE-UNAM)	25	5	20	20	15	15	
Alfredo Martínez (IBT-UNAM)	14	14	6	10	50	6	
Alfredo Fuentes (CIEco-UNAM)	30	10	20	10	10	20	
Enrique Riegelhaupt (REMBIO)	30	30	10	10	10	10	
Carlos Ramírez (Politécnico Grancolombiano)	11	25	25	7	25	7	
<b>Total</b>	135	91	101	72	133	68	600
<b>Ponderación</b>	<b>23%</b>	<b>15%</b>	<b>17%</b>	<b>12%</b>	<b>22%</b>	<b>11%</b>	

## Capítulo 3

### Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de la investigación, en principio se abordan los resultados para cada indicador de sustentabilidad, posteriormente se discute la integración de los indicadores en un índice y finalmente se exploran interacciones entre los distintos indicadores de sustentabilidad y sus posibles efectos en las políticas.

#### 3.1 Indicador ambiental Ia

##### 3.1.1 Resultados para etanol de caña de azúcar

Los resultados del balance de GEI se presentan en unidades de suma de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de energía del etanol ( $\text{kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ ) (Figura 3.1). Se presentan las emisiones del caso brasileño y del combustible fósil, con la finalidad de compararlas con las de México y de evaluar el potencial de reducción de emisiones GEI con respecto a la referencia fósil.

Para el caso del etanol de Brasil se incluyó un transporte del etanol local, de manera que las fronteras del sistema coincidieran con las analizadas para las modalidades en México. En el caso brasileño, sin considerar el transporte a las estaciones de mezclado, las emisiones son de  $26.6 \text{ kgCO}_{2e}/\text{G}_{\text{etanol}}$ . Considerando una distancia de transporte igual que en México las emisiones para Brasil alcanzan los  $27.5 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ . La opción de menores emisiones GEI para México corresponde a la producción de etanol con jugo directo y venta de electricidad excedente EDJE, con emisiones de  $36.8 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ . Ninguna de las modalidades analizadas para México obtiene una mitigación mayor que la resultante para el caso Brasileño.

Las emisiones de la referencia fósil fueron tomadas de [61], ya que no aún no existe un valor confiable de las emisiones en el ciclo de vida en la producción de gasolina en México.

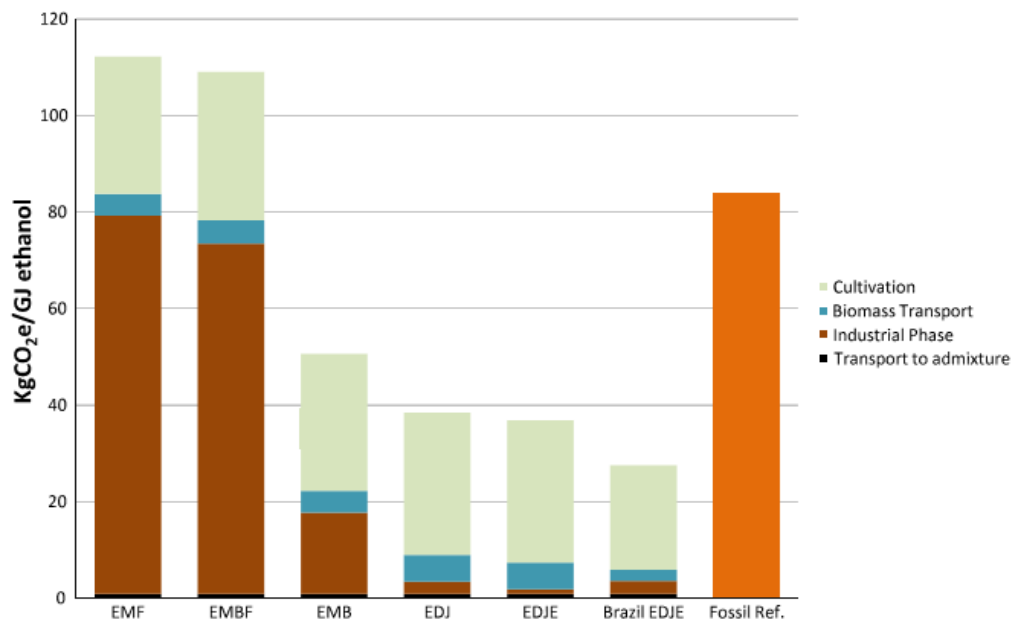


Figura 3.1 Emisiones de GEI para etanol de caña de azúcar, sin cambios de uso de suelo.

Los resultados muestran que las emisiones de la etapa agrícola son las más importantes en los casos EMB, EDJ, EDJE y Brasil donde representan entre 56% y 81% del total. En los casos EMF y EMBF alcanzan un 25% y 28% respectivamente, porque la etapa industrial contabiliza las mayores emisiones.

Se identificó a las variables que más influyen en el resultado de estas emisiones. La primera de ellas corresponde a la producción de fertilizantes donde los resultados en esta etapa alcanzan del 37% al 46% en los casos mexicanos y el 38% para el caso de Brasil. Estas emisiones se deben a las altas emisiones de  $N_2O$  durante la fabricación de los fertilizantes. Le siguen las emisiones de  $CH_4$  y  $N_2O$  por la quema de la caña para su cosecha manual y la quema en campo de los residuos de la cosecha. Estas contribuyen con el 29% de las emisiones en esta etapa en los casos EMF y EMBF respectivamente, mientras que para los casos EMB, EDJ y EDJE representa el 29%, asumiendo que en todos los casos un 95% de la superficie es sometida a esta práctica. En el caso brasileño las emisiones por esta fuente contabilizan el 35%, debido a que se asume que el 69% de la superficie cultivada se somete a esta práctica [61]. El tercer parámetro en importancia es la emisión de  $N_2O$  del suelo

debida a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Asumiendo que el 1% del fertilizante aplicado se transforma en  $N_2O$ , tal y como lo recomienda el IPCC, esta fuente tiene un rango del 11% al 14% de las emisiones de esta etapa, donde el caso de Brasil estas emisiones contribuyen con el 11%. Si bien los porcentajes son similares en los casos mexicanos y al caso brasileño, las emisiones absolutas son menores en un 31% para el caso brasileño debido a la menor tasa de aplicación de fertilizantes. La alta influencia de estas emisiones en los resultados totales ha sido señalado en otros estudios [119, 120]. Existe un fuerte debate sobre las emisiones por fertilizantes nitrogenados ya que investigaciones subrayan que estas emisiones pueden contribuir hasta con un 5% en peso del fertilizante aplicado [121] en lugar del 1% considerado en esta tesis, lo que aumentaría las emisiones de esta etapa un 58% para los casos EMF y EMBF; 44% para los casos EMB, EDJ y EDEJ, y 46% para el caso brasileño.

Finalmente, las emisiones por el uso de diesel en la maquinaria agrícola aportan el 10% en los casos EMF y EMBF, mientras que alcanzan el 9% para las modalidades EMB, EDJ y EDJE; mientras que para el caso brasileño alcanzan el 16%.

Por otra parte, las emisiones de la etapa industrial alcanzan el 70% y 67% de las emisiones totales para los casos EMF y EMBF respectivamente, mientras que para los casos EMB, EDJ y EDJE contribuye con el 33%, 7% y 3% respectivamente. La diferencia se debe a que el combustible empleado. Las mayores emisiones provienen de las modalidades donde se utiliza la combinación de combustóleo y bagazo para la producción de calor de proceso (EMF y EMBF) debido al uso de calderas poco eficientes y con bajas presiones de vapor que no permiten generar excedentes de electricidad y utilizan combustible fósil suplementario. Las emisiones más bajas se deben al uso exclusivo del bagazo como único combustible (EDJ, EDJE y el caso Brasileño), siendo menores para el caso EDJE debido a que se restan las emisiones evitadas debido a la generación de electricidad excedente de la planta de etanol, que es exportada al SEN. Si se asume el uso de calderas de alta presión se podría lograr un excedente de 25kWh/t caña lo que resultaría en un balance total de 34  $kgCO_{2e}/GJ_{etanol}$  para la modalidad EDJE, mientras que asumiendo un excedente de 50 kWh/t caña se tendrían emisiones totales de 24.9  $kgCO_{2e}/GJ_{etanol}$ . Estos resultados muestran

claramente las ventajas en emisiones de GEI que representa el utilizar la biomasa residual como combustible en los procesos del modo en que se realiza en Brasil, tal y como ha sido indicado en otros estudios [102, 119,120].

El transporte de la caña a la planta de etanol tiene una participación del 4% al 15% de las emisiones totales. Para las modalidades mexicanas los valores son muy similares en todos los casos al rondar los  $5 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ . En estos resultados juega un papel fundamental la distancia a las fábricas, que son similares en los casos analizados. En México las emisiones por el transporte de biomasa son mayores que en Brasil debido a las mayores distancias del campo a fábrica.

El transporte de etanol desde la destilería hasta la estación de mezclado genera emisiones poco significativas. En los casos mexicanos estas emisiones aportan del 0.8% al 2.4% de las emisiones totales. Un aumento al doble de la distancia de las fábricas de etanol a las terminales de almacenamiento harían que la participación de este transporte representara del 1.6% al 4.7% de las emisiones totales. Las emisiones de esta etapa empiezan a ser significativas cuando las distancias de transporte son muy largas, como ejemplo, al usar los datos de CA-GREET [95] para el transporte de etanol de Brasil a Estados Unidos las emisiones alcanzarían el 17% al considerar poco más de 12,000 km de distancia entre la fábrica de etanol y la estación de mezclado.

En cuanto a la asignación de emisiones los valores utilizados fueron 21.3 MJ/kg etanol y 16.5 MJ/kg azúcar, mientras que para la asignación por valor económico se estimó un valor de 0.6 USD/kg etanol y 0.286 USD/kg azúcar. Los resultados mostraron que para el método de asignación por valor económico las emisiones de la modalidad EMF fueron 10% mayores que en el caso de asignación por contenido energético, mientras que para el caso EMBF y EMB las emisiones aumentaron en un 8% y 17% respectivamente (Tabla 3.1). El resultado de mayores emisiones para el método de asignación por valor económico ya ha sido reconocido por otros autores [79, 110, 111]. Un aumento en el 30% del valor económico del etanol y manteniendo constante el valor económico del azúcar resulta en un aumento de las emisiones de un 21% para EMF, 18% para EMBF y 30% para el caso EMB, lo que demuestra la importancia de la elección del método de asignación en la mitigación

de emisiones de GEI y por lo tanto del potencial de reducción de emisiones de la producción de etanol para el sector transporte.

Para los casos EDJ, EDJE y Brasil EDJ se utilizó el método de sustitución según la recomendación de la ISO. El resultado está influenciado en gran medida por la electricidad que puede ser vendida a la red eléctrica, tal y como se señaló en la etapa industrial.

Tabla 3.1 Emisiones de CO<sub>2</sub>e para diferentes métodos de asignación

	Asignación por contenido energético (kgCO <sub>2</sub> e/GJ etanol)	Asignación por valor económico (kgCO <sub>2</sub> e/GJ etanol)
EMF	112.1	123.4
EMBF	109	118.2
EMB	36.5	42.5

Al suponer una expansión del cultivo sobre nuevas áreas, las emisiones de GHG se incrementan (figura 3.2). Son de particular importancia los casos en los que se cambia la selva alta por el cultivo de caña debido a que todas las modalidades resultan con emisiones superiores a la referencia fósil entre un 30% y un 160%. Sin embargo, el estudio MEDEC [69] evalúa que es posible expandir el cultivo de caña de azúcar en 2.9 millones de hectáreas sobre pastizales naturales y cultivados, por lo cual este caso no es el más probable en lo inmediato. Las emisiones por CUSd en los escenarios de expansión sobre pasturas y selvas bajas son bastante menores en las modalidades EMB, EDJ y EDJE.

Las emisiones por el cambio en el uso de suelo para las modalidades de producción de etanol en México tienen una gran influencia en las emisiones finales al suponer una expansión del área de cultivo. Las emisiones se contabilizaron para tres diferentes usos actuales de suelo en donde se supone una expansión del cultivo de la caña: Pastizal, Selva Baja, y Selva Alta. Los resultados varían desde una reducción de las emisiones en un 24% para el caso EDJE sobre Selva Baja, al compararse con la referencia fósil, hasta un aumento de las emisiones en un 267% con respecto a la referencia fósil para el caso EMBF sobre Selva Alta, lo que señala claramente que la expansión del cultivo de la caña de azúcar para

la producción de etanol en tierras de alta densidad de carbono resultaría en mayores emisiones de GEI, lo que concuerda con lo señalado por otros autores [72,73].

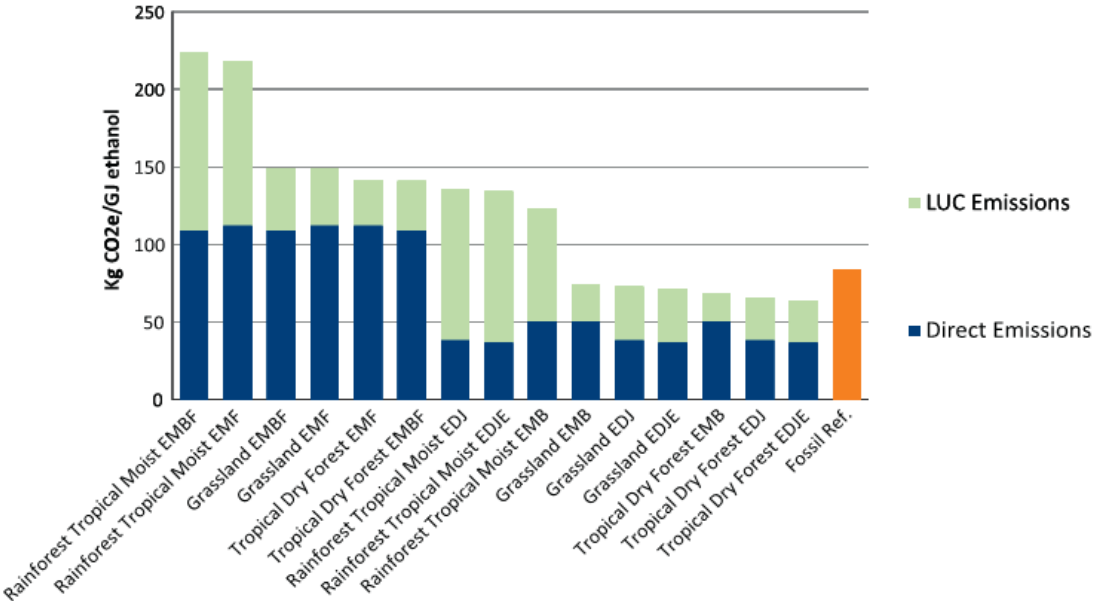


Figura 3.2 Emisiones de GEI para etanol con caña de azúcar, con Cambio en el Uso de Suelo.

3.1.2 Resultados para etanol de maíz y sorgo grano

En cuanto a los resultados del indicador ambiental de la producción de etanol a partir de sorgo grano y maíz considerando las fases agrícola, la industrial y de transporte, encontramos que la producción de etanol a partir de sorgo grano (figura 3.3) con un rendimiento medio es la opción que cuenta con menores emisiones en el ciclo de vida (30 kgCO<sub>2e</sub>/GJ<sub>etanol</sub>), con emisiones incluso menores a la opción EDJE que es la producción de etanol a partir de jugo de caña de azúcar directo y con un excedente de electricidad. Este resultado se debe a que los insumos en la etapa agrícola son pocos, ya que las labores agrícolas no son tan mecanizadas lo que repercute en un bajo nivel de consumo de diesel; y sobre todo a que no existe aplicación de fertilizantes nitrogenados, que como ya comentamos en el caso del etanol de caña, el los fertilizantes nitrogenados tienen un gran impacto debido a las altas emisiones que se generan durante su producción y a las emisiones de N<sub>2</sub>O por la aplicación del fertilizante, ya que el N<sub>2</sub>O tiene un potencial de



calentamiento 296 veces la del CO<sub>2</sub>. Esto mismo ocurre en el caso de Maíz con un rendimiento bajo, sin embargo, el rendimiento en campo en este caso es mucho menor, lo que en términos de nuestra unidad funcional representa mayores emisiones que el caso del Sorgo Medio. Cabe resaltar también que todas las modalidades de producción de etanol de sorgo y maíz presentan menores emisiones que el valor de referencia (83.8 kgCO<sub>2e</sub>/GJ<sub>fossil</sub>[61]) aunque al igual que en el caso de la caña, ninguna tiene menores emisiones que el caso de etanol de caña en Brasil.

Las emisiones podrían disminuirse si se logra una mayor eficiencia en la fertilización para los casos donde se emplea sobre todo fertilizante nitrogenado, además si en la etapa industrial se pudiera usar biomasa como combustible en lugar de combustóleo y gas natural, las emisiones de la etapa industrial disminuirían, haciendo estas alternativas más atractivas en términos de balance de emisiones.

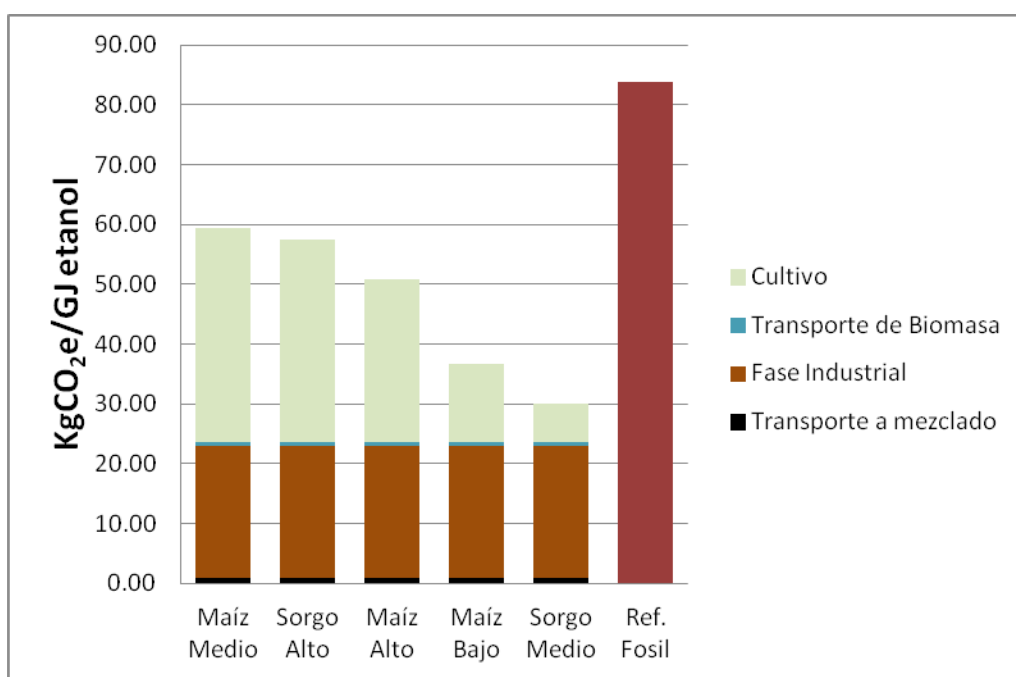


Figura 3.3 Emisiones GEI en el ciclo de vida de etanol de maíz y sorgo considerando las fases agrícola, la industrial y de transporte, sin CUSd.

Las emisiones de la etapa industrial y de transporte son las mismas porque consideramos las mismas tecnologías para su procesamiento y la misma distancia entre las plantas, las zonas de cultivo y la estación de mezclado.

Las emisiones de la etapa industrial alcanzan los  $22.1 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ , estas emisiones son altas porque consideramos que la planta funciona con carbón y gas natural como combustibles, debido a que a diferencia de la caña de azúcar, el maíz y sorgo no tienen un co-producto que puede ser utilizado para sustituir la energía demandada por el proceso de producción de etanol. Para sustituir los combustibles fósiles se requeriría entonces conseguir otras fuentes de energía, como podría ser la biomasa, como residuos agrícolas y forestales, sin embargo, esto requiere de análisis más detallados que van más allá del alcance de esta tesis.

Por su parte las emisiones del transporte de biomasa contabilizan  $0.5 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ , que son menores a los del caso de caña, ya que en los casos del sorgo y maíz es necesario transportar una menor cantidad de biomasa para producir una unidad de etanol. El transporte a la estación de mezclado alcanza los  $0.9 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$  al igual que el supuesto para los casos de etanol de caña. Los transportes entonces, no tienen una participación tan importante en las emisiones GEI.

En cuanto a la asignación de emisiones a los co-productos, en este caso los Granos Secos de la Destilación con Solubles (GSDCS), es de una importancia fundamental ya que debido a la metodología utilizada el 45% de las emisiones totales se asignan a éstos, por lo que de no darse la asignación de emisiones las emisiones del caso con mayor mitigación, sorgo medio, alcanzaría emisiones de  $54.7 \text{ kgCO}_{2e}/\text{GJ}_{\text{etanol}}$ .

Si añadimos la fase de cambio en el uso de suelo, y suponemos que los cultivos de sorgo y de maíz se establecen en áreas con cobertura vegetal, entonces las emisiones de GEI en el ciclo de vida pueden ser mayores que la referencia fósil (figura 3.4), sobre todo cuando consideramos el cambio en áreas con una cobertura vegetal con un alto stock de carbono como es el caso del bosque templado.

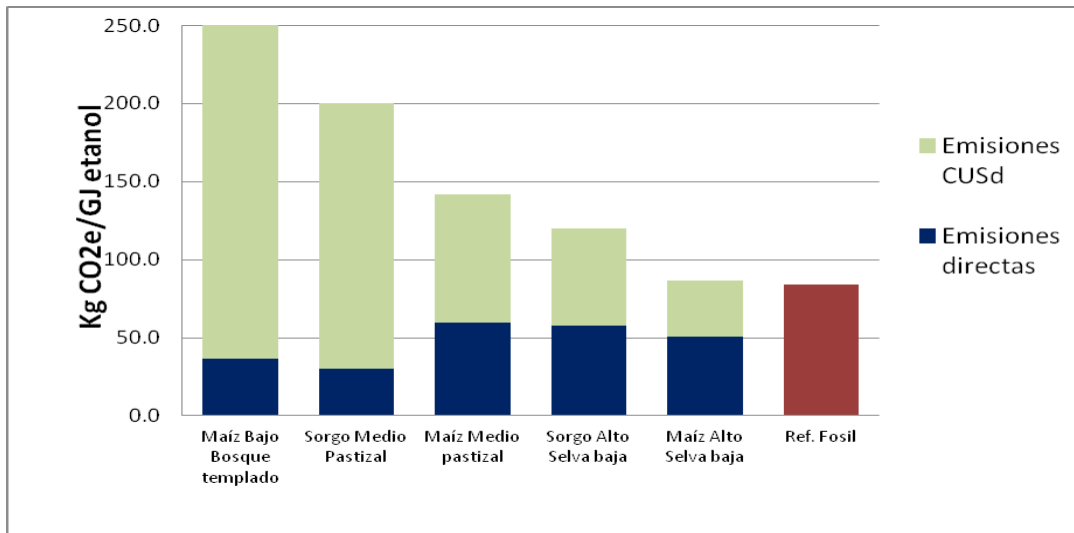


Figura 3.4 Emisiones GEI en el ciclo de vida de la producción de etanol de maíz y sorgo con CUSd

### 3.2 Indicador energético Ie

#### 3.2.1 Resultados para caña de azúcar

El balance de energía primaria se puede expresar como la relación de la energía primaria fósil de entrada con la energía renovable de salida (figura 3.5), en este caso produciendo solo etanol y en el caso EDJE etanol y electricidad. Esta forma de presentar los resultados permite observar los consumos energéticos de cada etapa de la producción. Los valores negativos en la etapa industrial de EDJE y Brazil EDJE indican la aportación de electricidad de la planta de etanol a la red eléctrica.

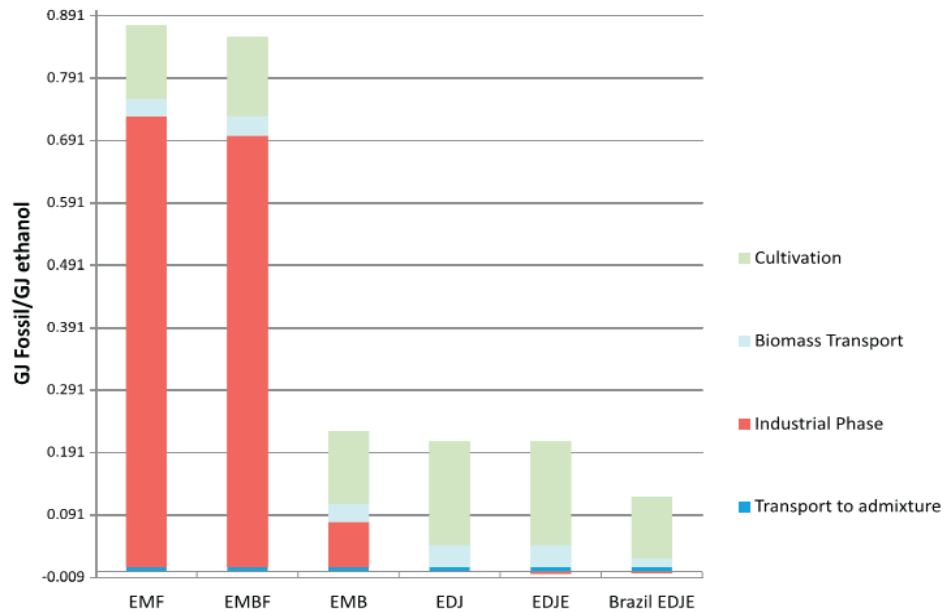


Figura 3.5 Balance energético de las modalidades de producción de etanol de caña para México y para el caso brasileño.

Otra forma de reportar los balances de energía primaria fósil es la relación Energía etanol/Energía fósil (Tabla 3.2). Si la relación es igual a 1 significa que no existe ninguna ventaja energética en la producción de etanol ya que la energía fósil de entrada es exactamente la misma que la energía que obtenemos de la energía renovable obtenida del etanol. Valores menores a 1 significan que la producción de etanol consume más energía que la que genera. Valores mayores a 1 significan que se obtiene más energía del etanol que la energía fósil que se consume en su producción. Los resultados del balance de energía primaria fósiles son mayores a 1 para todos los casos mexicanos. Se puede observar que esta “rentabilidad energética” varía dependiendo de la modalidad, y se aprecia que en ningún caso el balance energético es mayor al reportado para el caso brasileño.

Tabla 3.2 Balance energético de las modalidades de producción de etanol para México y para el caso brasileño expresado en la relación:

	EMF	EMBF	EMB	EDJ	EDJE	Brasil EDJE
GJ etanol/GJ Fósil	1.1	1.2	4.4	4.7	4.8	8.4

Los resultados indican una mayor importancia de las etapas agrícola e industrial en los resultados de balance energético de energía primaria fósil. En el caso de las modalidades EMB, EDJ y EDJE la etapa agrícola representa del 52% al 81% de la energía total demandada en la producción de etanol. Estos resultados son acordes a lo que ocurre en el caso brasileño donde la energía demandada por la etapa agrícola alcanza el 83%. En el caso de las modalidades EMF y EMBF la energía por la etapa agrícola es de 0.12 y 0.13 GJfósil/GJetanol, similar a los 0.13 GJfósil/GJetanol del caso EMB, sin embargo representan sólo el 13% y 15% de la energía total demandada, debido al uso de combustóleo en la etapa industrial de estas modalidades como combustible complementario para el proceso. Se observa que la demanda de energía primaria para la etapa agrícola es menor para el caso brasileño, sobre todo debido al menor consumo de fertilizantes, lo que repercute en una menor relación energética que cualquier modalidad mexicana analizada.

El uso del bagazo como fuente de energía del proceso industrial es un factor determinante en el resultado de la demanda de energía primaria fósil. Esto puede observarse en los escenarios EMF y EMBF donde la etapa industrial contribuye con el 82% del total de la energía fósil debido al uso de combustóleo como complemento al uso de bagazo para suministrar la energía del proceso. En el caso de EMB se observa también un consumo importante de energía (43%) debido a que se considera se importa una cantidad de electricidad de la red eléctrica nacional. En el caso EDJ el consumo de energía primaria fósil de la etapa industrial es cero debido a que la energía de esta etapa se suministra enteramente a partir del bagazo, e incluso para el caso EDJE y Brazil EDJE se tiene un excedente de electricidad en cual se exporta a la red eléctrica, que se indica como energía fósil negativa en la producción de etanol.

El transporte de caña a la fábrica contabiliza del 3% al 17% de la demanda de energía primaria fósil en las modalidades mexicanas, y se observa que al igual que en el caso de las emisiones de GEI esta demanda de energía fósil es menor para el caso brasileño debido a distancias más cortas de las plantaciones de caña a las plantas industriales y al uso de sistemas de transporte más eficientes, con camiones de mayor capacidad de carga. Finalmente el transporte a las terminales de mezclado tiene una importancia marginal en las modalidades mexicanas al contabilizar el 1% al 3.7% de la demanda energética fósil.

### 3.2.2 Resultados para maíz y sorgo grano

En lo que respecta al balance energético la opción con una menor demanda de energía fósil (figura 3.6) fue el caso de Sorgo Medio, el cual alcanza una relación energía renovable/energía fósil de 3.3 (Ver tabla 3.3). Este caso es menor a los calculados para los casos de caña EMB, EDJ y EDJE, esto es debido principalmente a que los insumos agrícolas son mucho menores que en los demás casos de caña, maíz y sorgo analizados. Particularmente una ausencia de fertilización nitrogenada, ya que significa cero consumo energético por la producción del fertilizante.

La fase industrial del ciclo de vida es la que representa el mayor gasto energético, ya que como mencionamos en la sección 3.1.2 la energía demandada por el proceso se satisface con gas natural y carbón.

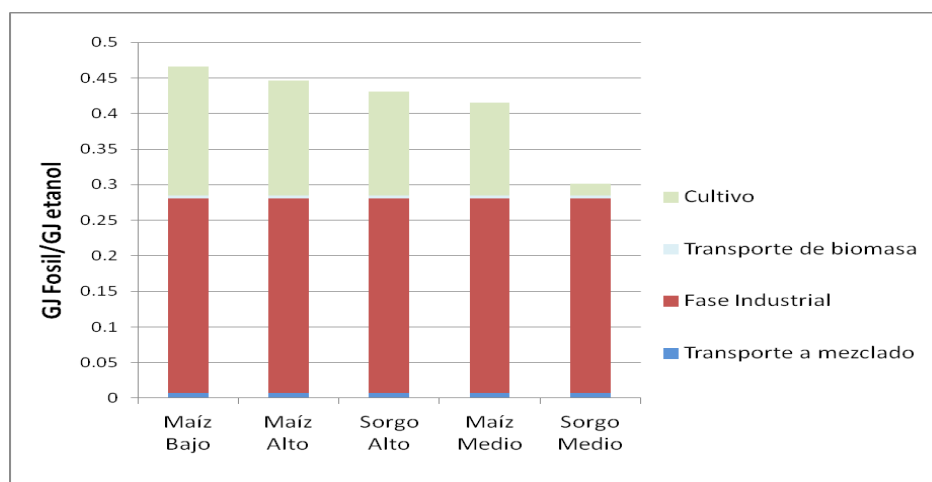


Figura 3.6 Consumo de energía fósil en la producción de etanol de maíz y sorgo.

La asignación de energía a los co-productos se realiza de la misma manera que la asignación de emisiones por lo que el 45% de la energía fósil consumida se asigna a los GSDCS.

Tabla 3.3 Balances energéticos de la producción de etanol de sorgo grano y maíz.

	Maíz Bajo	Maíz Alto	Sorgo Alto	Maíz Medio	Sorgo Medio
GJ etanol/GJ Fósil	2.1	2.2	2.3	2.4	3.3

### 3.3 Indicador Uso de agua

Como puede observarse en la figura 3.7 el agua verde es la que presenta el mayor consumo de agua en todas las modalidades de producción. La caña de azúcar tiene un mayor consumo de agua verde debido a permanece de doce a trece meses en el campo en comparación a los seis meses del maíz y el sorgo. Como era de esperarse, los cultivos que tienen riego son los que resultan con un mayor consumo de agua azul. La modalidad con mayor uso de agua azul corresponde a etanol a partir de sorgo de alto rendimiento con 26.4 m<sup>3</sup>/GJ, seguido de etanol de maíz con alto y medio rendimiento con 21.7 m<sup>3</sup>/GJ y 17.1 m<sup>3</sup>/GJ respectivamente. El agua azul es la que representa un impacto directo sobre los recursos de agua dulce, que podría significar una competencia con otros usos [80]. El consumo en la producción agrícola representa los mayores gastos de agua, ya que la producción industrial consume del 0.05% al 0.8% en el agua total (azul y verde) [51]. El proceso de producción de etanol a partir de maíz y sorgo consume una menor cantidad de agua ( $3.6 L_{\text{agua}}/L_{\text{etanol}}$ ) con respecto a la producción de etanol de caña de jugo directo ( $21L_{\text{agua}}/L_{\text{etanol}}$ ), sin embargo existen iniciativas para disminuir el consumo de agua en la producción de etanol de caña a la mitad [48], sin embargo, es claro que lo que mientras se utilice agua de riego en la producción de la materia prima, el consumo de agua será alto.

La asignación de agua debido a la presencia de coproductos tiene un efecto grande en los resultados, ya que en los casos de maíz y sorgo, el 45% del consumo de agua se asigna a los granos secos de la destilación.

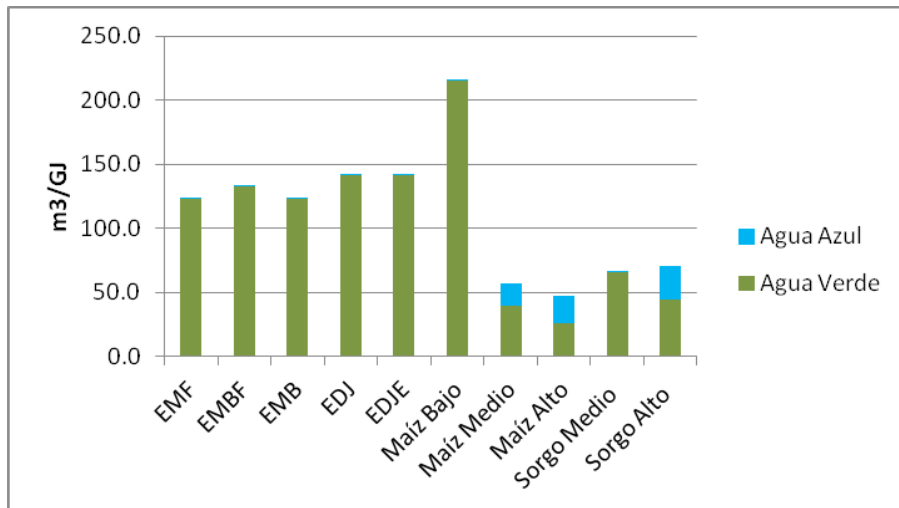


Figura 3.7 Consumo de agua para la producción de etanol de los diferentes escenarios.

Es importante señalar que aún no existe una metodología consensada internacionalmente para la cuantificación del uso y consumo de agua en la producción de bienes (incluido el etanol), razón por la que el debate continúa. Los resultados en este trabajo presentados para este indicador son una primera aproximación al uso de agua en la producción de etanol a partir de diferentes materias primas, con distintas tecnologías, bajo diferentes localidades de producción y modalidades de producción agrícola, y con una asignación del consumo de agua con el método de contenido energético.

### 3.4 Indicador Uso de suelo

Como puede observarse (figura 3.8) las modalidades con un mejor desempeño para este indicador corresponde a la producción de etanol a partir de jugo directo con y sin excedente de electricidad (EDJ y EDJE). La razón de esto son los altos rendimientos de etanol a partir de caña, que en estos casos alcanzan poco más de 5,800 L/ha o 0.0065 ha/GJ (ver Anexo A para detalles de los datos), ya que todo el jugo de la caña se utiliza para la producción de etanol. Los otros casos de producción de etanol a partir de caña tienen un mayor uso de área porque el jugo de la caña se utiliza para la producción de azúcar, y sólo las mieles se utilizan para la producción de etanol, lo que resulta en una producción de etanol de 616 L/ha o 0.0637 ha/GJ (para miel C) y 1,197 L/ha o 0.0392 ha/GJ (para miel B). Los resultados son consistentes con lo encontrado en el trabajo de Chávez-Rodríguez y Nebra



[51].En cuanto al maíz, la modalidad de producción con un mejor desempeño en este indicador es la de maíz con rendimiento alto, esto se debe al alto rendimiento que tiene en campo (ya que el rendimiento en fábrica es el mismo para todas las modalidades de maíz), que alcanza las 9 t/ha. El caso que presenta el desempeño menos favorable es el de la producción de etanol con bajo rendimiento, y también se debe al poco rendimiento, ya que la producción es de sólo 1 t/ha, de hecho es la opción menos recomendable según este indicador. En el caso del sorgo, al igual que en el maíz, los rendimientos definen la mejor opción en este indicador.

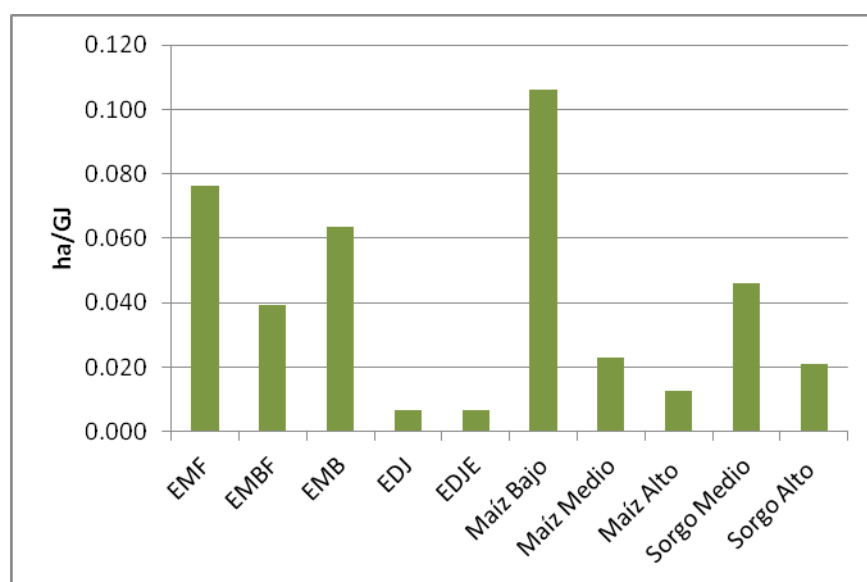


Figura 3.8 Resultados del indicador uso de suelo.

La eficiencia de conversión de la energía solar en biomasa, conocida como eficiencia fotosintética (la fracción de energía luminosa que puede ser convertida en energía química durante el proceso de fotosíntesis) es determinante para el desempeño en este indicador, ya que determina en buena medida el rendimiento o productividad en el campo. Según Garret y Grisham [122] la caña de azúcar es el cultivo más eficiente para convertir energía del sol en energía química con una eficiencia de 7% a 8%. Por otra parte, la eficiencia promedio para el maíz y otros granos se encuentra entre 1-2% [123]. Esto concuerda con los resultados del indicador que reporta un mejor desempeño para el caso de la caña de azúcar.

### 3.5 Indicador económico

En la figura 3.9 y tabla 3.4 se presentan los costos para cada uno de los escenarios analizados. Es de resaltar que los valores de producción de etanol a partir de caña de azúcar son mayores a los costos de producción en Brasil (USD \$0.177), mientras que los valores de producción de etanol a partir de maíz a excepción del caso de maíz de bajo rendimiento, son menores a los costos de producción de etanol de maíz reportados para Estados Unidos (arriba de \$0.200 USD).

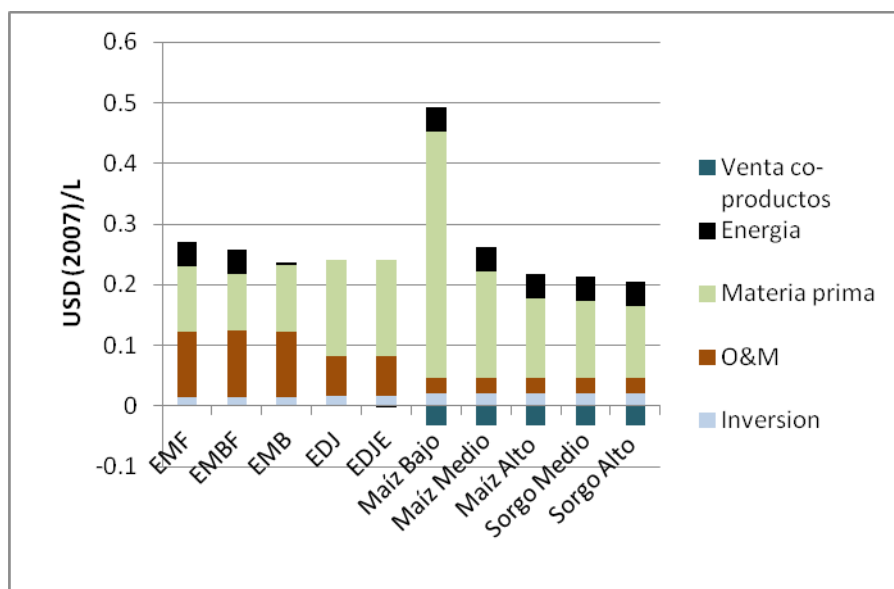


Figura 3.9 Resultados de  $I_{ec}$

Tabla 3.4 Resultados de  $I_{ec}$

EMF	EMB F	EMB	EDJ	EDJE	Maíz Bajo	Maíz Medio	Maíz Alto	Sorgo Medio	Sorgo Alto	
USD /L	0.270	0.257	0.236	0.227	0.225	0.460	0.229	0.185	0.181	0.173

Como puede observarse en la mayor parte de los casos el mayor componente de los costos de producción es la materia prima. Esto se verifica en particular en los casos donde la materia prima es el cultivo, que corresponde a todos los casos de maíz y sorgo, y a los de caña en las modalidades EDJ y EDJE. En las modalidades de EMF y EMB la materia prima

es la melaza, que es la miel final de la producción de azúcar a partir de caña, mientras que en la modalidad EMBF la materia prima es la miel B.

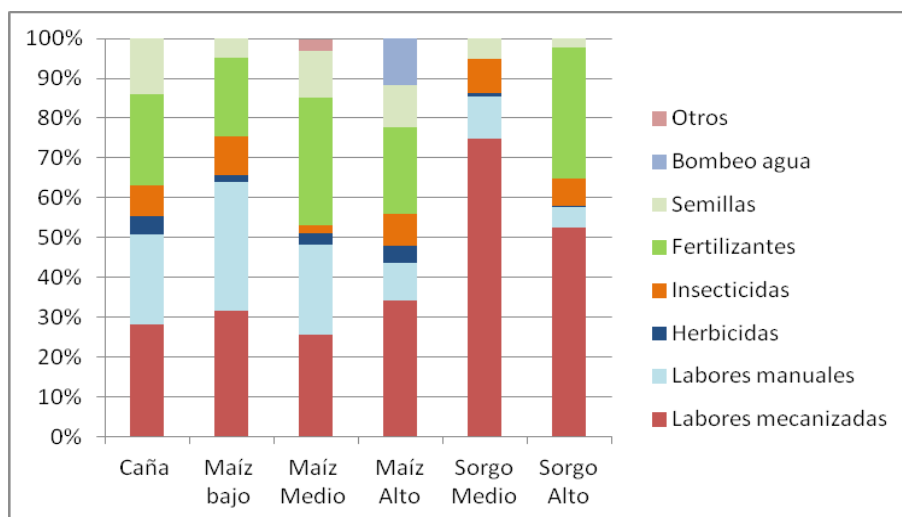


Figura 3.10 Resultados de  $I_{ec}$

En la figura 3.10 se presenta la estructura de costos de la producción de caña, maíz y sorgo grano en las modalidades analizadas. Los principales componentes son las labores manuales y mecanizadas, así como los fertilizantes, con una participación del 65% al 90% del costo total. Las labores mecanizadas representan los principales costos de producción, seguido de los fertilizantes (a excepción de las opciones que no tienen fertilización) y de la mano de obra. Es interesante notar como en la producción de maíz, dependiendo del nivel de tecnificación es la participación de la mano de obra, en el caso del maíz bajo se tiene una alta participación de trabajo manual, lo que hace más cara la producción, situación que contrasta con el caso del maíz de alto rendimiento que corresponde a una alta tecnificación, donde la mano de obra tiene una baja participación y que repercute en un menor costo de producción.

Cabe señalar que para los cálculos se utilizaron los costos de producción de la materia prima y no los precios. Utilizar los precios de la materia prima en lugar de los costos de producción tiene un gran efecto en el costo de producción del etanol. En el caso de la caña de azúcar los costos de producción con la información recabada en campo ascienden a \$22.69 (USD 2007) lo que repercute en un costo de producción de \$0.227 (USD 2007) bajo

la modalidad EDJ. En 2011 el precio de la caña de azúcar alcanzó los \$60 USD [71] por lo que el costo de producción se elevaría a \$0.426 USD en esta modalidad. Por su parte, el costo de producción de la tonelada de maíz para las modalidades analizadas se encuentra en el rango de \$150 a \$470 (USD 2007)<sup>7</sup>, con un costo de producción del etanol de \$0.185 a \$0.460, sin embargo, en 2008 y 2011 los precios internacionales de los granos llegaron a sus niveles máximos históricos, por lo que el precio de la tonelada de maíz alcanzó los \$1500 USD [124] por las razones mencionadas en el capítulo 1. Este precio implicaría un costo de producción del etanol de \$1.351. En los casos de la miel b y miel B se tomaron los precios debido a que no existe un precio de producción como tal debido a que se tratan de co-productos de la producción de azúcar. El precio de la tonelada de melaza según datos de campo ronda los \$60 USD, mientras que el de la miel B está alrededor de los \$70 USD/t [125], con los costos de producción de etanol de \$0.270 (con combustóleo), \$0.236 (sin combustóleo) y \$0.257. El precio de la melaza a nivel internacional alcanzó los \$200 USD en 2009 [126], lo que representaría costos de producción de \$0.512 y \$0.478 con y sin combustóleo respectivamente.

El caso del costo de la energía es también un componente importante en el costo de producción de etanol, a excepción de las modalidades EDJ y EDJ, que no requieren de combustibles adicionales para su procesamiento debido a que el bagazo proporciona toda la energía demandada por el proceso, incluso en el caso de la modalidad EDJE se tienen ingresos por la venta del excedente de electricidad que se tiene en la planta. Los costos de operación y mantenimiento son muy similares en los casos de la producción de etanol a partir de sorgo grano y maíz, mientras que varían en las otras modalidades. En las opciones de producción de etanol de maíz y sorgo la venta de co-productos tiene una participación importante en el costo final, esto se debe a la gran cantidad de co-productos que se generan en la producción de etanol, y al mercado que existe para estos co-productos. De no contarse con los ingresos de los co-productos el costo de producción del etanol en las distintas modalidades se incrementaría de un 7% a un 18%.

---

<sup>7</sup> Todos los datos se encuentran en USD 2007.

### 3.6 Indicador Social

Los resultados del indicador social se presentan en la figura 3.11. En los casos en donde se tienen co-productos como la producción de etanol y azúcar, y la producción de etanol y granos secos de la destilación, para ser consistentes con la metodología adoptada para la asignación de emisiones de GEI, se realizó una asignación de empleos basados en el poder calorífico del producto y los co-productos. Esta consideración tiene un efecto directo en los resultados del indicador social, ya que el caso con mayores empleos resultó ser el que carece de un co-producto, que corresponde al caso de la producción de etanol a partir de jugo directo de caña. Es importante tener presente que los resultados del indicador social están normalizados a la producción de una unidad energética (TJ), que no es lo mismo que los empleos creados por unidad productiva (fábrica y zona de suministro agrícola) y de los empleos por unidad de superficie. Los empleos en la etapa agrícola por unidad de superficie tienden a ser mayores para los casos de la caña de azúcar y la producción de maíz con rendimientos medios. La etapa con mayor creación de empleo fue por mucho la etapa agrícola. Estos empleos están determinados por las prácticas agrícolas y el nivel de tecnificación de la producción, así como de los rendimientos por hectárea.

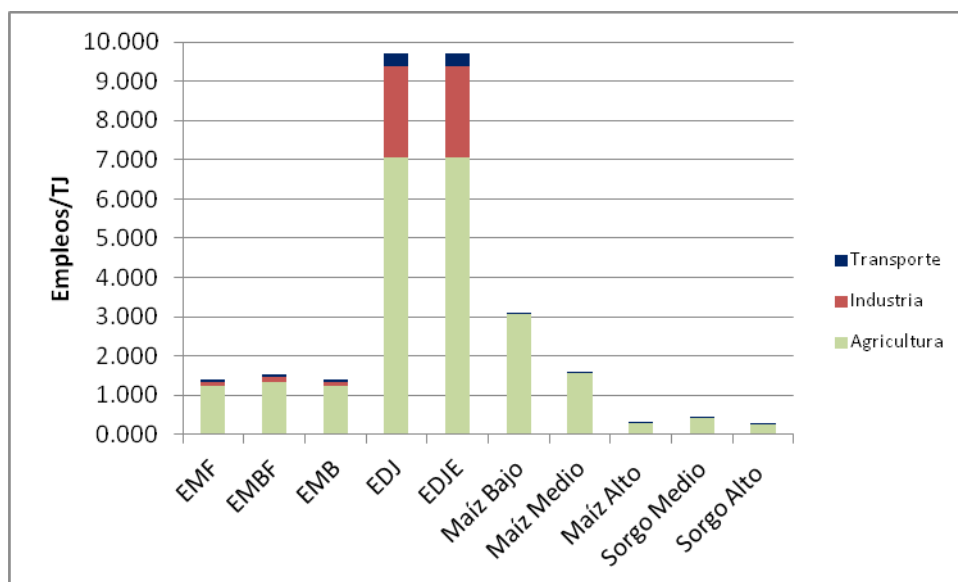


Figura 3.11 Resultados del indicador social.

### 3.7 Presentación gráfica de los indicadores

Cuando se realiza la evaluación de los indicadores de sustentabilidad, una práctica común es realizar graficas radiales para mostrar la aportación de cada indicador a la sustentabilidad del sistema [43].

Para facilitar la lectura de las gráficas se dividieron en una para las opciones de caña de azúcar (figura 3.12) y otra para las opciones de sorgo grano y maíz (figura 3.13).

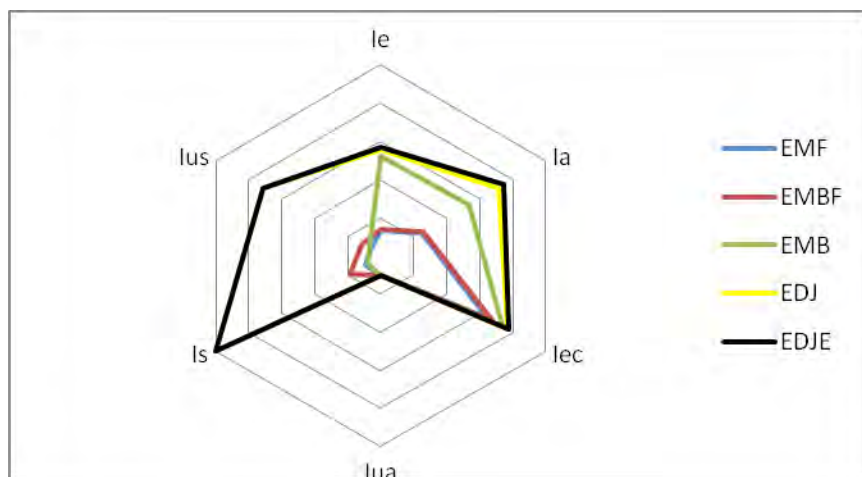


Figura 3.12 Resultados de Indicadores de sustentabilidad para la producción de etanol a partir de caña de azúcar.

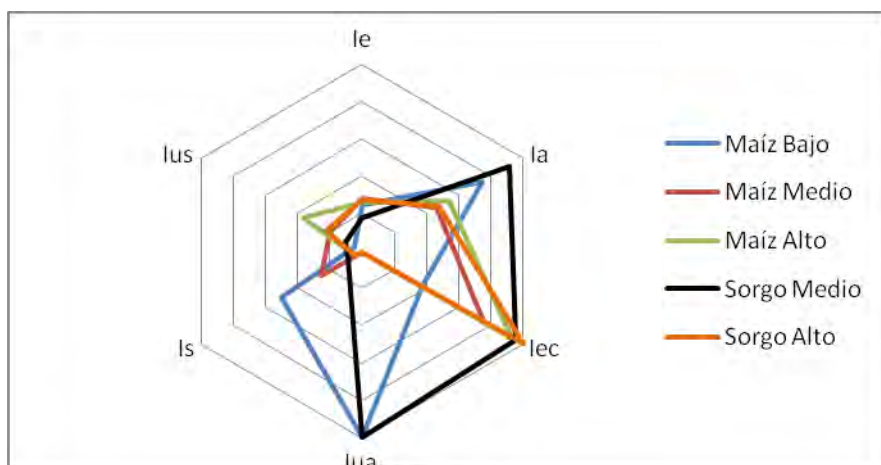


Figura 3.13 Resultados de Indicadores de sustentabilidad para la producción de etanol a partir de maíz y sorgo grano.

Cuando la opción analizada se acerca más a la sustentabilidad, la figura que forman los vértices en donde se encuentra el valor de cada indicador se va pareciendo más a la forma exterior del gráfico, por lo que podría decirse que mientras más se “llene” el gráfico, estaremos hablando de una modalidad de producción de etanol más sustentable. Para el caso de la caña de azúcar es evidente que el caso que presenta un mejor desempeño en la sustentabilidad es el de EJDE, mientras que en segundo lugar se encuentra la opción EJD. Para los casos de maíz y sorgo la opción que cuenta con el mejor desempeño es la correspondiente a Sorgo Medio.

Este tipo de gráficas nos ayudan a identificar las fortalezas y debilidades de cada modalidad de producción de etanol en cuanto a su sustentabilidad, por ejemplo, si miramos al caso de la producción de etanol a partir de Sorgo Alto, veremos que tiene un buen desempeño en el indicador  $I_{ec}$ , sin embargo, muestra un pobre desempeño en los indicadores  $I_e$ ,  $I_a$ , debido en gran medida a la energía gastada para riego.

### **3.8 Índice de sustentabilidad ( $I_{SUS}$ )**

Los resultados obtenidos para el índice de sustentabilidad ( $I_{SUS}$ ) del etanol se presentan en la figura 3.14. En donde se puede observar que la opción con una mayor calificación, por un amplio margen, fue la producción de etanol a partir de jugo directo de caña de azúcar con un excedente de electricidad 0.687 (EDJE), y el que obtuvo la peor calificación fue la producción de etanol a partir de miel C y que utiliza combustóleo en su proceso  $I_{SUS}=0.251$ .

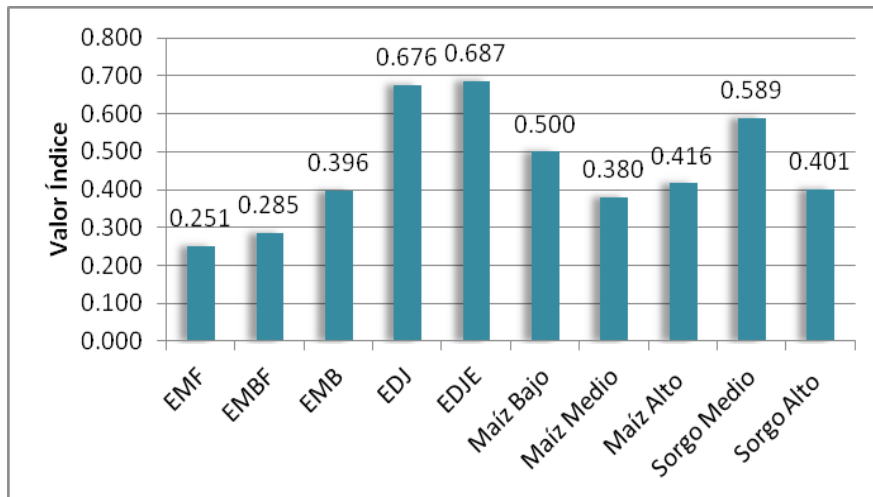


Figura 3.14 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades.

Al aplicar diferentes ponderaciones a los indicadores (graficas 3.15-3.18) encontramos que la opción con el mejor desempeño en el índice, EDJE, se mantiene en todos los casos.

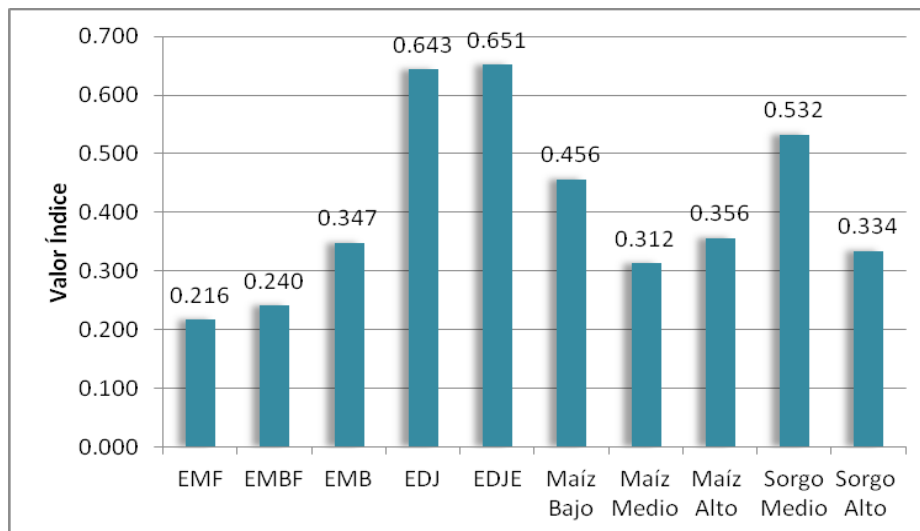


Figura 3.15 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación igual para cada indicador.



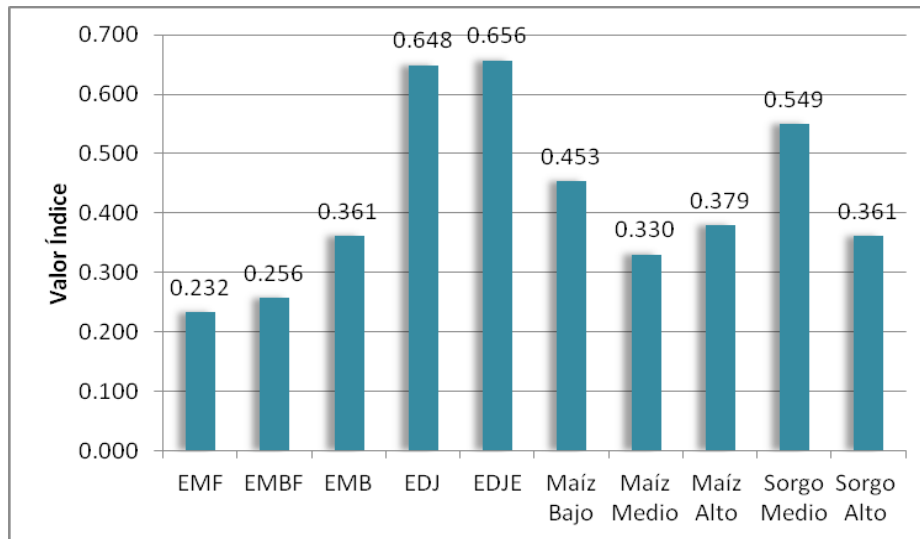


Figura 3.16 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación mayor a  $I_{ec}$  y el resto de indicadores con el mismo peso.

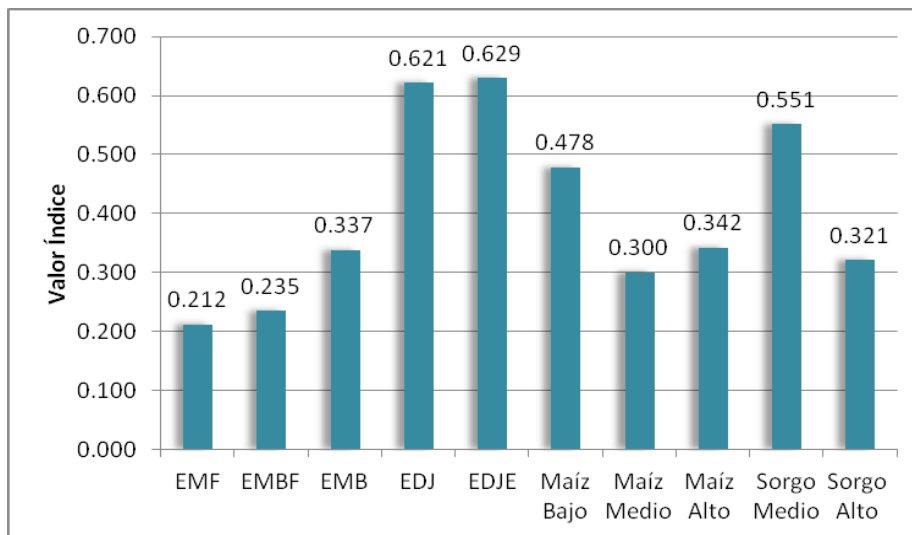


Figura 3.17 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación mayor a  $I_{ua}$  y el resto de indicadores con el mismo peso.

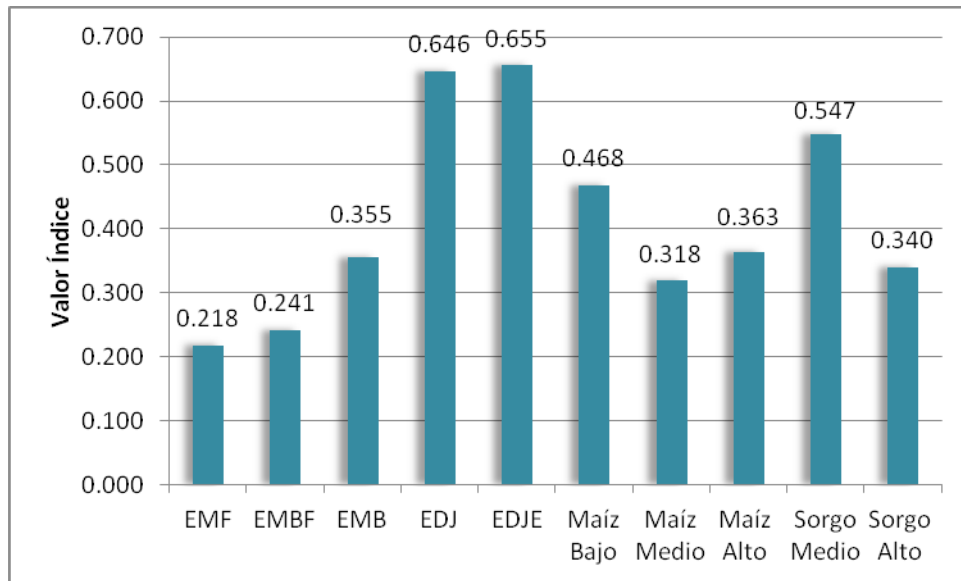


Figura 3.18 Resultados del Índice de sustentabilidad para las diferentes modalidades, ponderación mayor a  $I_a$  y el resto de indicadores con el mismo peso.

Existen una serie de intercambios (*trade-offs*) en las diferentes modalidades de producción y que serían importantes para el desarrollo de políticas, los cuales se ponen en evidencia en la evaluación de cada indicador y se observan en las gráficas radiales.

Considerando el caso de la producción de etanol a partir de maíz, y volviendo a la ponderación de los expertos, observamos que la opción con el  $I_{SUS}$  más alto resultó ser la que utiliza maíz de bajo rendimiento. Esto se debe a que tiene un buen desempeño en los indicadores  $I_a$ ,  $I_e$ ,  $I_{ua}$ ,  $I_s$  debido a que utiliza pocos insumos agrícolas, por lo que tiene un bajo consumo de energía fósil y pocas emisiones GEI, además por tratarse de maíz de temporal el agua azul que utiliza se debe únicamente al procesamiento industrial. Por tratarse de una producción agrícola poco tecnificada, la mayor parte de las tareas se realizan de manera manual, lo que influye mayoritariamente en la alta generación de empleo. Sin embargo, tiene un mal desempeño en los indicadores  $I_{ec}$ ,  $I_{us}$ , debido al gran uso de mano de obra en la etapa agrícola que incide directamente en el costo de producción, y al bajo rendimiento que significa un alto uso de tierra para la producción de una unidad de etanol. La ponderación asignada a los distintos indicadores a esta modalidad de obtención de etanol le permitió destacar como la mejor opción para la producción de etanol a partir de

maíz. Sin embargo, considerar esta como la mejor opción para la producción de etanol y tratar de aplicar esta modalidad de producción para un programa nacional, tendría un potencial de sustitución de gasolina limitado, debido a que se requerirían importantes extensiones de cultivo. Por su parte, la producción de etanol de alto rendimiento tiene un buen desempeño en el uso de suelo y en el costo económico, sin embargo, aplicar una política de producción masiva de etanol con esta modalidad implicaría una menor mitigación de emisiones GEI debido al alto uso de insumos, así como un alto uso de agua azul para riego y una menor generación de empleo.

Una situación muy similar ocurre en el caso del sorgo donde la producción con rendimientos medios tiene una baja demanda de insumos agrícolas y riego, pero presenta un mejor desempeño en cuanto al uso de suelo comparado con la producción de maíz de bajo rendimiento, así como una menor demanda de mano de obra para el establecimiento del cultivo, lo que convierte a ésta en una opción interesante.

En el caso del etanol a partir de caña de azúcar las opciones que presentaron el mejor desempeño fueron las que se obtendrían a partir de jugo directo, con y sin excedente de electricidad. Estas opciones aportarían una buena mitigación de GEI, ya que aunque requieren de una gran cantidad de insumos para la producción agrícola, tienen una buena productividad en campo, así mismo son autosuficientes en el consumo de energía para el proceso industrial. Tienen además un costo de producción que no es tan bueno como el de la actual producción de etanol en Brasil, pero que no es tan alto como otras opciones analizadas, presenta además un muy buen desempeño en el indicador de uso de suelo y un mediano desempeño en el uso de agua ya que aunque estamos hablando de caña de temporal el consumo en fábrica es mayor que el reportado para el maíz. Otra de las ventajas es que además genera gran cantidad de empleo debido a que la caña es intensiva en mano de obra cuando no está completamente mecanizada la producción como en estos casos.

Las opciones que presentan un mejor desempeño en los indicadores de sustentabilidad, tanto individualmente como agregados bajo ciertos criterios, deben ser analizadas a escalas mayores y basados en evaluaciones más integrales que consideren una más amplia evaluación de los posibles impactos de las políticas energéticas en los recursos hídricos, en

el uso del suelo, en las emisiones de GEI y en las condiciones socio-económicas, debido a las interacciones e intercambios (*trade-offs*) mencionados<sup>8</sup> [127-130].

Una exploración de las implicaciones en las emisiones GEI y su mitigación, uso de agua y aspectos socio-económicos, aplicados a un escenario de introducción masiva de etanol a partir de jugo directo de caña para la sustitución de gasolina en México, se presenta en el Anexo B, y que representa el estudio de factibilidad que forma parte del título de esta tesis.

---

<sup>8</sup> Joint ICTP-IAEA Workshop on Uncovering Sustainable Development CLEWS; Modeling Climate, Land-use, Energy and Water (CLEW) Interactions. Véase: <[http://cdsagenda5.ictp.it/full\\_display.php?ida=a10145&fid=21118](http://cdsagenda5.ictp.it/full_display.php?ida=a10145&fid=21118)>

## Conclusiones

En este trabajo se realizó el análisis de la sustentabilidad de ocho modalidades de producción de etanol de primera generación a partir de caña de azúcar, maíz y sorgo grano. Se evaluaron y analizaron seis indicadores de sustentabilidad: 1) indicador ambiental  $I_a$ , que cuantifica las emisiones de GEI de la producción de etanol en el ciclo de vida; 2) indicador energético  $I_e$ , que evalúa el rendimiento energético de la producción de etanol basado en el ciclo de vida; 3) indicador de consumo de agua  $I_{ua}$ , que cuantifica el uso de agua verde y azul en la producción de etanol considerando el agua para la producción agrícola de la materia prima y el agua consumida en el procesamiento industrial; 4) indicador uso de suelo  $I_{us}$ , que cuantifica el área necesaria para producir una unidad energética de etanol; 5) indicador económico  $I_{ec}$ , que calcula el costo de producción del etanol; 6) indicador social  $I_s$ , que evalúa la creación de empleo en la producción de etanol.

Una vez evaluados los indicadores de sustentabilidad y agregados en un índice compuesto, los resultados determinaron que la opción con un mejor desempeño corresponde a la modalidad EDJE (etanol de jugo directo de caña con excedente de electricidad hacia la red eléctrica), seguido por EDJ (etanol de jugo directo de caña), este resultado se mantuvo aún con diferentes factores de ponderación de los indicadores de sustentabilidad. A pesar de lograr identificar el caso que tiene un mejor desempeño en el índice de sustentabilidad, el índice agregado no permite descubrir algunos de los intercambios (*trade-offs*) de las opciones analizadas como se aprecia en el caso de Maíz Alto.

En general, los resultados muestran que para lograr una producción de etanol de primera generación con mayor sustentabilidad, de manera que signifique una verdadera opción para contribuir a la transformación del sistema energético, se requiere una serie de medidas que implican decisiones sobre: a) la materia prima de la que se obtiene el etanol, dando prioridad a aquellas que tiene una mayor productividad por unidad de área y que tienen una mayor eficiencia fotosintética, como es el caso de la caña de azúcar en relación al sorgo y al maíz de acuerdo a nuestros resultados y análisis del indicador ambiental; b) evitar que los

cultivos de la materia prima se desarrollen en áreas con un alto contenido de carbono, como bosque o selvas altas como se mostró en el análisis del indicador de gases de efecto invernadero para todas las modalidades; c) que se mejoren las prácticas agrícolas, sobre todo mejorar la eficiencia de fertilización, disminuir el uso de diesel y utilizar exclusivamente cultivos de temporal que no requieran de riego, y que al mismo tiempo se logre un equilibrio entre el uso de mano de obra y una cierta mecanización para mejorar la creación de empleo sin sacrificar los costos de producción como se infiere de los resultados y análisis de los indicadores económico, social, uso de agua, y ambiental y de los casos de maíz alto y de maíz bajo y de caña de azúcar analizados; d) que en las modalidades de producción industrial y de las fuentes de energía que se utilizan en estos procesos se evite el uso de combustibles fósiles, lo cual mejora el desempeño energético, ambiental y económico de la producción de acuerdo a los resultados y análisis de los indicadores ambiental y energético en las modalidades de caña de azúcar ; e) que se creen mercados para los co-productos ya que su uso mejora el desempeño de los indicadores ambiental, energético y económico como se apreció en las modalidades de maíz y sorgo y azúcar (caso EDJE). Por las razones anteriores podemos concluir que se confirma la hipótesis de investigación con la que se guió esta tesis.

Esta tesis permite conocer algunas de las características que requiere la producción de etanol de primera generación para ser sustentable e identificar materias primas y modalidades de producción promisorias, reconociendo también que se requiere aún de mucha investigación para poder mejorar las evaluaciones y análisis de sustentabilidad. En particular, es necesario incorporar la evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el cambio indirecto en el uso de suelo y desarrollar sus metodologías ya que se ha reconocido como una fuente importante de emisiones GEI. Así mismo, es necesario mejorar el conocimiento científico sobre el cual se construyen los cálculos de ACV, un ejemplo de esto es el caso de las potentes emisiones de N<sub>2</sub>O en términos de potencial de calentamiento, ya que aún se debate en la comunidad científica respecto al porcentaje de la contribución de este contaminante en el proceso de nitrificación debido a la fertilización nitrogenada que se observaron en la mayoría de las modalidades de producción analizadas.

De igual forma, es importante investigar a profundidad la verdadera importancia de la llamada “agua verde”, ya que si bien el “agua azul” es la que representa una competencia directa por los recursos de agua, el “agua verde” también podría asignarse a la producción de alimentos o a proporcionar servicios ambientales como la recarga de mantos acuíferos.

Por otra parte, es necesario proponer otras metodologías para la cuantificación del empleo en la producción de biocombustibles, ya que hasta el momento son escasas y no se han discutido aún las implicaciones de realizar asignación de empleos, de la manera en que se realiza la asignación de emisiones GEI en el ciclo de vida. Ésto debería derivar también en el desarrollo de una metodología única para cuantificar los empleos generados.

En los estudios de ACV, económicos y consumo de agua, es necesario ampliar la base de datos para que incorporen análisis estadísticos de propagación de errores, lo que permitiría representar los resultados con un rango de error o probabilidad. Para esto es necesario buscar mecanismos para la colección sistemática de datos, tanto de la etapa agrícola como industrial.

Finalmente, se requiere amplia investigación a distintas escalas sobre el efecto de las interacciones e intercambios entre las distintas dimensiones e indicadores de sustentabilidad, para analizar el efecto que algunas políticas ambientales pueden tener sobre las políticas económicas y sociales, o las implicaciones y resultados contraproducentes que las políticas económicas podrían tener sobre aspectos ambientales y sociales.

## Referencias

- [1] Malkina-Pykh, I. Sustainable Energy. WIT Press. Russia. 2002.
- [2] Lopes-Coelho, R. On the concept of energy: History and philosophy for science teaching. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 1 (2009); 2648–2652.
- [3] Crease, R. Energy in the History and Philosophy of Science. *Encyclopedia of Energy*, volume 2. 2004.
- [4] Grubler, A. Energy Transitions. 2008. *The Encyclopedia of Earth*. <[http://www.eoearth.org/article/Energy\\_transitions](http://www.eoearth.org/article/Energy_transitions)>
- [5] < <http://www.hdropole.ch/Hdropole/Intro/WorldE.gif>>
- [6] EIA (Energy Information Administration, DOE), 2010. *International Energy Outlook 2010*, EIA/DOE, Estados Unidos.
- [7] Chester, L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy Policy* 38 (2010); 887 –895.
- [8] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007. Synthesis Report*. 2007.
- [9] Chow, J. Koop, RJ. Portney, RP. Energy Resources and Global Development. *Science*. 302 (2003); 1528-1531.
- [10] Rosen, MA. Energy Sustainability: A Pragmatic Approach and Illustrations. *Sustainability* (2009) 55-80.
- [11] Grasl H. et al *World in Transition. Towards Sustainable Energy Systems*. German Advisory Council on Global Change (WBGU), Germany. 2004.
- [12] Afgan, NH. Carvalho, NG. Hovanov, NV. Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy* 28 (2000); 603- 612.
- [13] United Nations World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford University Press .1987.
- [14] Gallopin, G. A systems approach to sustainability and sustainable development. UN. CEPAL. 2003.
- [15] Yale University. 2005 Environmental sustainability Index. 2005.
- [16] Klöpffer, W. Life Cycle based methods for sustainable product development. *International Journal LCA*. 8(3) (2003); 157-159.



- [17] Islas J, Manzini F, Macías P. Las nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México (análisis y propuesta). Instituto de Investigaciones legislativas del Senado de la República. 2004.
- [18] WBGU (German Advisory Council on Global Change). Future Bioenergy and Sustainable Land Use. 2009.
- [19] Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Go Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud, 201: Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [20] Thornley, P. Increasing biomass based power generation in the UK. *Energy Policy* 34 (2006); 2087–2099.
- [21] Goldemberg, J. Teixeira, CS. Guardabassi, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* 35 (2008); 2086–97.
- [22] Dias, MOS. Cunha, MP. Jesus, CDF. Rocha, GJM. José Geraldo C. Pradella, JGC. Rossell, CEV. Filho, RM. Bonomi, A. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? *Bioresource Technology* 102 (2011); 8964–8971.
- [23] Shapouri, H. Duffield, J. Wang, M. The energy balance of corn ethanol: an update. Agricultural economics report no. 813, USDA; 2002.
- [24] Patzek, T. Thermodynamics of the corn-ethanol biofuel cycle. *Crit Rev Plant Sci* 23(6) (2004 ); 519–67.
- [25] Pimentel, D. Patzek, T. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Nat Resour Rev* 14 (2005); 65–76.
- [26] Quirin, M. Gärtner, SO. Pehnt, M. Reinhardt, GA. CO<sub>2</sub> mitigation through biofuels in the transport sector. Status and perspectives, IFEU. Germany. 2004.
- [27] Dias de Oliveira, M. Vaughan, Jr M. Rykiel, E. Ethanol as a fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *Bioscience* 55 (2005); 508–93.
- [28] Farrell, A. Pelvin, RJ. Turner, BT. Jones, AD. O’Hare, M. Kammen, DM. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 3011 (2006); 506–8.
- [29] Gnansounou, E. Duriart, A. Villegas, J. Panichelli, L. Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances. *Bioresour Technol* 100 (2009); 4919–30
- [30] Nguyen TLT, Hermansen JE, Sagisaka M. Fossil energy savings potential of sugar cane bio-energy systems. *Appl Energy* 86 (2009); S132–9

- [31] Nguyen, TLT. Gheewala, SH. Garivait, S. Full chain energy analysis of fuel ethanol from cane molasses in Thailand. *Appl Energy* 85 (2008); 722–34
- [32] Ometto, AR. Hauschild, MW. Lopes Roma, WN. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess* 14 (2009); 236 – 247.
- [33] Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Programa Mexicano de Etanol como Aditivo de la Gasolina. México. 1988.
- [34] LPDB (Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos), Diario Oficial de la Federación, Febrero, México; 2008.
- [35] SENER (Secretaría de Energía), Programa de Introducción de Bioenergéticos. México; 2008.
- [36] Elghali, L. Clift, R. Sinclair, P. Panoutsou, C. Bauen, A. Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems. *Energy Policy* 35 (2007); 6075-6083.
- [37] Buchholz, TS. Volk, TA. Luzadis, VA. A participatory systems approach to modeling social, economic and ecological components of bioenergy. *Energy Policy* 35 (2007); 6084-6094.
- [38] Acosta-Milch, L. Lucht, W. Bondeau, A. Beringer, T. Integrated assessment of sustainability trade-offs and pathways for global bioenergy production: Framing a novel hybrid approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011); 2791-2809.
- [39] Gnansounou, E. Assessing the sustainability of biofuels: a logic-based model. *Energy* 36 (2011); 2089-2096.
- [40] Afgan, NH. Carvalho, MG. Hovanov, NV. Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy* 28 (2000); 603-612.
- [41] Evans, A. Strezov, V. Evans, TJ. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009); 1082–1088.
- [42] Maser, O. et al. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. Marco de evaluación MESMIS. GIRA y Mundi-Prensa México. 1999.
- [43] Astier, M. Maser, O. Galván-Miyoshi, Y. Evaluación de Sustentabilidad. Un Enfoque Dinámico y Multidimensional. SEAE/CIGA/ECOSUR/CIEco/UNAM/GIRA/Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable, España. 2008.
- [44] van Dam, J. Junginger, M. Faaij, APC. From the global efforts on certification of bioenergy towards an integrated approach based on sustainable land planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2010); 2445-2472.
- [45] Bohringer, C. Jochem. Measuring the immeasurable- a survey of sustainability indices. *Ecological Economics*. 63 (2007); 1-8.

- [46] Afgan, N., Begic, F. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system- Bosnian case. *Energy*. 32 (2007) 1979-1985.
- [47] Roldán, C. Evaluación jerárquica de la sustentabilidad de plantas generadoras de electricidad. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Doctorado. México. 2007.
- [48] Smeets, E. Junginger, M. Faaij, A. Walter, A. Dolzan, P. Turkenburg, W. The sustainability of Brazilian ethanol – An assessment of the possibilities of certified production. *Biomass and Bioenergy* 32 (2008); 781-813.
- [49] Walter, A. Dolzan, P. Quilodrán, O. de Oliveira, JC. Da silva, C. Piacente, F. Segerstedt, A. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy* 39 (2011); 5703-5716.
- [50] Pereira, CLF. Ortega, E. Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010); 77-82.
- [51] Chávez-Rodríguez, MF. Nebra, SA. Assessing GHG Emissions, Ecological Footprint, and Water Linkage for Different Fuels. *Environ. Sci. Technol* 44 (2010); 92-52-9257.
- [52] Luo, L. van der Voet, E. Huppes, G. Life cycle and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009); 1613-1619.
- [53] Yu, S. Tao, J. Economic, energy and environmental evaluations of biomass-based fuel ethanol projects based on life cycle assessment and simulation. *Applied Energy* (2009), S178-S188.
- [54] IEA (International Energy Agency). *Transport, Energy and CO2. Moving towards sustainability*. 2009.
- [55] BP. *Statistical Review of World Energy June 2009*. 2009. Véase: <[http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2008/STAGING/local\\_assets/2009\\_downloads/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2009.pdf](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2009_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2009.pdf)>
- [56] Smil V. *Energy in the Twentieth Century: Resources, Conversions, Costs, Uses, and Consequences*. *Ann. Rev. Energy Environ* 25 (2000); 21-51.
- [57] FISG (The Federal Interagency Solutions Group, Oil Budget Calculator Science and Engineering Team). *Oil Budget Calculator, Deepwater Horizon: Technical documentation*. 2010.
- [58] Nakicenovic, N. et al. *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*. Vienna University of Technology, International Institute for Applied Systems Analysis.

International Conference within Austrian EU Presidency Energy Paths-Horizon 2050, Vienna 6 March 2006.

[59] RFA (Renewable Fuels Association); 2009.  
<<http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>>.

[60] Escobar, C. Lora, ES. Venturini, OJ. Yáñez, EE. Castillo, EF. Almazan, O. et al. Biofuels: environment, technology and food security. *Renewable and sustainable energy Reviews* 13 (2009); 1275–87.

[61] EUC (Commission of the European Communities). DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. < <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>>.

[62] Renewable Fuel Standard 2 (RFA2)  
<<http://www.epa.gov/otaq/fuels/renewablefuels/regulations.htm>>

[63] World Economic Forum. *Energy Vision Update 2008: Solving the Energy Puzzle through Innovation*. 2008.

[64] SENER (Secretaría de Energía). *Balance Nacional de Energía 2008*. 2009.

[65] SENER. Sistema de Información energética.  
<<http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>>

[66] Enriquez PM. *Prospectiva de la Cogeneración de la Agroindustria de la Caña de azúcar en México*. Presentación en: VI Reunión Nacional RED Mexicana de Bioenergía y Simposio Internacional de Proyectos Bioenergéticos, México; 2009.

[67] Islas, J. Manzini, F. Masera, O. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32 (2007); 2306 – 2320.

[68] Masera, O. et al. *La bioenergía en México: La bioenergía como catalizador de desarrollo sustentable*. Comisión Nacional Forestal. México. 2005.

[69] Johnson, T. Alatorre, C. Romo, Z. Liu, F. (“México: Estudio para la Disminución de Emisiones de Carbono”, MEDEC). The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank; 2009.

[70] PRONAC (Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación(SAGARPA), México; 2007.

[71] UNC (Unión Nacional de Cañeros); 2009. < <http://www.caneros.org.mx/> >.

- [72] Searchinger, T. Heimlich, R. Houghton, RA. Dong, F. Elobeid, A. Fabiosa, J. et al. Use of US croplands for biofuel increases greenhouse gases through emissions from land use change. *Science* 2008;319:1238–40.
- [73] Fargione, J. Hill, J. Tilman, D. Polasky, S. Hawthorne, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 2008;319:1235–8.
- [74] Kim, S. Dale, BE. Indirect land use change for biofuels: Testing predictions and improving analytical methodologies. *Biomass and Bioenergy*. (2011) 35; 3235-3240.
- [75] INE (Instituto Nacional de Ecología). Dirección de Economía Ambiental. Propuesta de certificación como instrumento para regular la producción y uso de biocombustibles en México. Propuesta de Consultoría presentado por C.A. Corporación de Servicios Profesionales, México; 2008.
- [76] INE. Dirección de Economía Ambiental. Análisis de tres casos específicos para producción de biodiesel en México a partir de soya, utilizando el modelo INE para evaluación energética y ambiental. Propuesta de Consultoría presentado por C. A. Corporación de Servicios Profesionales, México; 2008.
- [77] INE. Dirección de Economía Ambiental. La certificación como instrumento para regular la producción de los biocombustibles en México. Propuesta de Consultoría presentado por C. A. Corporación de Servicios Profesionales, México; 2008.
- [78] Nonhebel S, Global food supply and the impacts of increased use of biofuels, *Energy* (2011), doi:10.1016/j.energy.2011.09.019.
- [79] Rodoutt, BG. Eady, SJ. Sellahewa, J. Simons, L. Bektash, R. Water footprint at the product brand level: case study and further challenges. *Journal of Cleaner Production*, 17 (2009); 1228-1235.
- [80] UNEP, Öko Institute, IEA Bioenergy. The bioenergy and water nexus. 2011.
- [81] Fingerman KR, Torn MS, O'Hare MH, Kammen DM. Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters* (2010); 5: 014020 7pp.
- [82] Hoekstra A, Chapagain A. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing. 2008.
- [83] Wu M, Mintz M, Wang M, Arora S. *Consumptive Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline*. Argonne National Laboratory. Energy systems Division. USA. 2009.
- [84] Gerbens-Leenes, W. Arjen Y. Hoekstra, AY. van der Meer, TH. The water footprint of bioenergy. <[www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0812619106](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0812619106)>
- [85] Fehrenbach et al. *Criteria for a Sustainable Use of Bioenergy on a Global Scale*. Agencia Ambiental Federal (Alemania). 2008.

- [86] SENER-BID-GTZ. Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. 2006.
- [87] Macedo, IC. Seabra, JEA. Silva, JEAR. Green house gases in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy* 32 (2008); 582-595.
- [88] National Research Council of the National Academies. Water implications of biofuels production in the United States. 2008.
- [89] SAGARPA. Sistema de Información Agropecuaria (SIAP).VIOCs.
- [90] Börgesson, P. Tufvesson, LM. Agricultural crop-based biofuels – resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. *Journal of Cleaner Production*, 19 (2011) 108-120
- [91] Rebitzer, G.; Hunkeler, D. Life Cycle Costing: Ambitious; Opportunities, and Limitations. *International Journal in LCA*. 2003.8 (5) 253-256.
- [92] Hunkeler, D. Societal LCA methodology and case study. *International Journal LCA*. 2006.11 (6); 371-382.
- [93] IPCC, Third assessment report – climate change 2001 – complete online versions. <[http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/?src=/climate/ipcc\\_tar/wg1/248.htm](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/248.htm)>.
- [94] Energy and Resources Group. ERG Biofuel analysis meta-Model. <<http://rael.berkeley.edu/sites/default/files/EBAMM/>>
- [95] California environmental Protection Energy. <<http://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs.htm#modeling>>
- [96] RTFO (Renewable Transport Fuel Obligation). <<http://www.renewablefuelsagency.gov.uk/carboncalculator>>
- [97] IPCC, Guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 4. Energy. Agriculture, forestry and other land use; 2006.
- [98] SENER. Balance Nacional de Energía 2007. Secretaría de Energía. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Dirección General de Información y Estudios Energéticos, México; 2008.
- [99] IPCC, Guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 2. Energy; 2006
- [100] Elsayed MA, Matthews R, Mortimer ND. Carbon and energy balances for a range of biofuels options. Project No. B/B6/00784/REP URN 03/836. Project carried out as part of the DTI Sustainable Energy Programme. <<http://www.rms.lv/bio nett / Fil es / Fi le / Bi o D E2003101% 20DTI % 20 bio d iesel% 20LC A% 20study.pdf>>.

- [101] INEGI. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990–2002. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, México; 2006.
- [102] Börjesson P. Good and bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what determines this? *Appl Energy* 2009;86:589–94.
- [103] Reijnders L, Huijbregts MAJ. *Biofuels for Road Transport. A Seed to Wheel Perspective*. Springer; 2009.
- [104] ISO. ISO Norm 14040:2006 and 140444:2006. Life cycle assessment: principles and framework. *Environmental Management*; 2006.
- [105] Dominguez-Faus, R., Powers, S.E., Burken, J.G., Alvarez, P.J. The Water Footprint of Biofuels: A drink or Drive Issue? *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 3005-3010.
- [106] FAO (Food and Agriculture Organization). CROPWAT model [Online]. Available at: <[http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html)>.
- [107] FAO. CLIMWAT for CROPWAT. <<http://www.fao.org/nr/water>>.
- [108] Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper, vol. 56. 1998.
- [109] NCM (Normales Climatológicas de México). Available at: <<http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/norm/index.htm>>.
- [110] ASDC (Atmospheric Science Data Center).NASA. Available at: <<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>>
- [111] Moreira JR. Water use and impacts due to ethanol production in Brazil. International Conference on “Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries”, Hyderabad, India. 2007.
- [112] Wu M, Mintz M, Wang M, Arora S. Consumptive Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline. Argonne National Laboratory. Energy systems Division. USA. 2009.
- [113] Cornland D, Johnson F, Yamba F, Chidumayo E, Morales M, Kalumiana O, Mtonga-Chidumayo S. Sugarcane Resources for Sustainable Development: A Case Study in Luena, Zambia. Stockholm Environmental Institute. 2001.
- [114]SENER-BID-GTZ. Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. 2006.
- [115] Swenson D. Input-Outrageous: The Economic Impacts of Modern Biofuels Production. 2006. Véase: < <http://nercrd.psu.edu/Biofuels/Swenson.pdf>>

- [116] Hettinga, WG. Junginger, HM. Dekker, SC. Hoogwijk, M. McAloon, AJ. Hicks, KB. Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach. *Energy Policy* 37 (2009) 190-203.
- [117] Comision Federal de Electricidad (CFE). Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico 2009. 29ª edición.
- [118] Neuwahl F, Löschel A, Mongelli I, Delgado L. Employment impacts of EU biofuels policy: Combining bottom-up technology information and sectoral market simulations in an input-output framework. *Ecological Economics* 2008; 68: 447-460.
- [119] E4Tec, The RSB GHG accounting scheme. Feasibility of a meta-methodology and way forward. Version 4.1; 2009. < [http://cgse.epfl.ch/webdav/site/cgse/shared/Biofuels/Documents%20and%20Resources/09-10-08\\_E4Tech%20Report%20GHG%20Accounting\\_V4%201\\_08October09.pdf](http://cgse.epfl.ch/webdav/site/cgse/shared/Biofuels/Documents%20and%20Resources/09-10-08_E4Tech%20Report%20GHG%20Accounting_V4%201_08October09.pdf) >.
- [120] Winrock International. The Impact of Expanding Biofuel Production on GHG emissions. White Paper #1: Accessing and interpreting existing data. < [http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0904\\_Winrock\\_International\\_-\\_White\\_paper\\_\\_1\\_GHG\\_implications\\_biofuel.pdf](http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0904_Winrock_International_-_White_paper__1_GHG_implications_biofuel.pdf) >.
- [121] Crutzen PJ, Mosier AR, Winiwarter KASmithW. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos Chem Phys Discuss* 2007;7:11191–205.
- [122] Garrett, RH. Grisham, CM. *Biochemistry*. Cengage Learning. Tercera edición. 2005.
- [123] Santra, SC. *Ecology: basic and applied*. M.D. Publications Pvt. Ltd. 1994.
- [124] Ajanovic, A. Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy* 36 (2011); 2070-2076.
- [125] Panorama de la caña de azúcar y los biocombustibles en México < [http://www.ine.gob.mx/descargas/con\\_eco/2009\\_sem\\_biocombustibles\\_pres\\_06\\_menriquez.pdf](http://www.ine.gob.mx/descargas/con_eco/2009_sem_biocombustibles_pres_06_menriquez.pdf)>
- [126] Gopal, AR. Kammen, DM. Molasses Ethanol has Superior Lifecycle Greenhouse Gas Performance than Cane juice-based Sugarcane Ethanol. <<http://www.lcacenter.org/LCAX/presentations/183.pdf>>
- [127] Bazilian, M. et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy* 39 (2011) 7896 –7906.
- [128] FAO. Bioenergy and food security: The BEFS Analytical Framework. Environment and Natural Resources Management Series No. 16, p. 91, FAO, Roma. 2011.



[129] WEF (World Economic Forum). Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus. Island Press. Washington. 2011.

[130] Wong, J. The Food-Energy-Water Nexus. Center for American Progress, Washington, DC. 2010.

[131] Lozada, I. Islas, J. Grande G. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010); 486-492.

[132] van den Wall Bake, JD. Jinginger, M. Faaij, A. Poot, T. Walter, A. Explaining the experience curve: Cost reduction of Brazilian ethanol from sugar cane. Biomass and Bioenergy 33 (2009); 644-658.

## ANEXO A

### Datos para el cálculo de los indicadores Iec, Is, Iua.

#### Datos Económicos Etanol de Miel C con combustóleo (EMF)

Etanol caña de Miel C (melaza)		
Capacidad de Planta L/año	7200000	[118]
Costo de Capital Base de Destilería	\$4,191,184	[113]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$418,118	[118]
Inversión año 2 25%	\$1,047,796	
Inversión año 3 30%	\$1,257,355	
Inversión año 4 20%	\$838,237	
Inversión año 5 25%	\$492,000	
Costo Total	\$4,610,302	
Costo de operación y mantenimiento	\$1,883,376	[132]
Vida útil de la planta	25	
horas de operación / año	4800	
Litros de etanol por kg de melaza	0.235	[113]
Costo de la melaza	\$61.98	[113]
Consumo de combustóleo GJ/kg	0.0122	[114]
Precio del combustóleo USD/GJ	\$6.3	[116]
Consumo de electricidad kWh/kg	0.218	[114]
Precio de la electricidad (2007 USD / kwh)	0.116	[69]

#### Datos Económicos Etanol de Miel B con combustóleo (EMBF)

Etanol caña de Miel B		
Capacidad de Planta L/año	7200000	[113]
Costo de Capital Base de Destilería	\$4,191,184	[113]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$418,118	[118]
Inversión año 2 25%	\$1,047,796	
Inversión año 3 30%	\$1,257,355	
Inversión año 4 20%	\$838,237	
Inversión año 5 25%	\$492,000	
Costo Total	\$4,610,302	
Costo de operación y mantenimiento	\$1,883,376	[118]
Vida útil de la planta	25	
horas de operación / año	4800	
Litros de etanol por kg de Miel B	0.28	[113]
Costo de Miel B USD/t	\$70	
Consumo de combustóleo GJ/kg	0.0122	[114]
Precio del combustóleo USD/GJ	\$6.3	[69]
Consumo de electricidad kWh/kg	0.218	[114]
Precio de la electricidad (2007 USD / kwh)	0.116	[69]

### Datos Económicos Etanol de Miel C (EMB)

Etanol caña de Miel C (melaza)		
Capacidad de Planta L/año	7200000	[118]
Costo de Capital Base de Destilería	\$4,191,184	[113]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$418,118	[118]
Inversión año 2 25%	\$1,047,796	
Inversión año 3 30%	\$1,257,355	
Inversión año 4 20%	\$838,237	
Inversión año 5 25%	\$492,000	
Costo Total	\$4,610,302	
Costo de operación y mantenimiento	\$1,883,376	[132]
Vida útil de la planta	25	
horas de operación / año	4800	
Litros de etanol por kg de melaza	0.235	[113]
Costo de la melaza	\$61.98	[113]
Consumo de electricidad kWh/kg	0.218	[114]
Precio de la electricidad (2007 USD / kwh)	0.116	[69]

### Datos Económicos Etanol de Jugo directo (EDJ y EDJE)

Capacidad de planta en millones de litros al año	170	[69]
Costo de Capital	\$55,080,000	[69]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$5,508,000	
Inversión año 2 25%	\$13,770,000	
Inversión año 3 30%	\$16,524,000	
Inversión año 4 20%	\$11,016,000	
Inversión año 5 25%	\$13,770,000	
costo total de planta	\$60,588,000	
Operación y mantenimiento USD/año	\$27,369,244	[69]
Vida útil de la planta	25	[69]
horas de operación por año	4800	[69]
Litros de etanol por t de caña	83.17	
Caña molida t/año	2044006	[69]
Costo del transporte de caña	\$3.06	[131]
Costo por t de caña	\$19.63	Dato de campo
Costo total de la caña t	\$22.69	
Superficie requerida	<b>29200</b>	
Rendimiento en campo t/ha	70	Dato de campo
Venta de electricidad kwh/t caña	8.8	[87]
Precio de venta de la electricidad (USD / kwh)	\$0.0825	[69]

### Datos Económicos Etanol Sorgo Medio

Capacidad de planta millones de litros/año	189	
Costo de inversión	\$70,397,500	[115]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$7,039,750	
Inversión año 2 25%	\$17,599,375	
Inversión año 3 30%	\$21,119,250	
Inversión año 4 20%	\$14,079,500	
Inversión año 5 25%	\$17,599,375	
costo total de planta	\$77,437,250	
Operación y mantenimiento (incluyendo costos de enzimas y levadura) USD / año	\$10,043,840	[115]
Vida útil de la planta	25	[115]
Factor de capacidad	0.79	[115]
Rendimiento en planta L/t sorgo	433.9	Base de datos IFEU
Volumen utilizado t/año	344,604	
Costo de transporte de sorgo 100 km (USD/t)	\$6.87	[69]
costo del sorgo (USD/t)	\$130.00	[89]
Costo total de sorgo (USD/t)	\$136.87	
Superficie requerida por la planta (ha/año)	137842	
Rendimiento en campo de sorgo t/ha	2.5	[89]
Consumo de gas natural (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del gas natural USD/GJ	\$5.33	[116]
Consumo de carbón (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del carbón USD/GJ	2.72	[116]
Uso de electricidad (kWh/L etanol)	0.506	Base de datos IFEU
Precio de la electricidad / kWh	0.116	[69]
Subproductos (Granos secos de la destilación GSD) t/t sorgo	0.4469	Base de datos IFEU
Precio de los GSD USD/t	\$82.66	[117]

### Datos Económicos Etanol Sorgo Alto

Capacidad de planta millones de litros/año	189	
Costo de inversión	\$70,397,500	[115]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$7,039,750	
Inversión año 2 25%	\$17,599,375	
Inversión año 3 30%	\$21,119,250	
Inversión año 4 20%	\$14,079,500	
Inversión año 5 25%	\$17,599,375	
costo total de planta	\$77,437,250	
Operación y mantenimiento (incluyendo costos de enzimas y levadura) USD / año	\$10,043,840	[115]

Vida útil de la planta	25	[115]
Factor de capacidad	0.79	[115]
Rendimiento en planta L/t sorgo	433.9	Base de datos IFEU
Volumen utilizado t/año	344,604	
Costo de transporte de sorgo 100 km (USD/t)	\$6.87	[69]
costo del sorgo (USD/t)	\$130.00	[89]
Costo total de sorgo (USD/t)	\$136.87	
Superficie requerida por la planta (ha/año)	63230	
Rendimiento en campo de sorgo t/ha	5.45	[89]
Consumo de gas natural (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del gas natural USD/GJ	\$5.33	[116]
Consumo de carbón (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del carbón USD/GJ	2.72	[116]
Uso de electricidad (kWh/L etanol)	0.506	Base de datos IFEU
Precio de la electricidad / kWh	0.116	[69]
Subproductos (Granos secos de la destilación GSD) t/t sorgo	0.4469	Base de datos IFEU
Precio de los GSD USD/t	\$82.66	[117]

### Datos Económicos Etanol Maíz Bajo

Capacidad de planta millones de litros/año	189	
Costo de inversión	\$70,397,500	[115]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$7,039,750	
Inversión año 2 25%	\$17,599,375	
Inversión año 3 30%	\$21,119,250	
Inversión año 4 20%	\$14,079,500	
Inversión año 5 25%	\$17,599,375	
costo total de planta	\$77,437,250	
Operación y mantenimiento (incluyendo costos de enzimas y levadura) USD / año	\$10,043,840	[115]
Vida útil de la planta	25	[115]
Factor de capacidad	0.79	[115]
Rendimiento en planta L/t maíz	433.9	Base de datos IFEU
Volumen utilizado t/año	344,604	
Costo de transporte de maíz 100 km (USD/t)	\$6.8	[69]
costo del maíz (USD/t)	\$462.7	[89]
Costo total de maíz (USD/t)	\$469.6	
Superficie requerida por la planta (ha/año)	319078	
Rendimiento en campo de maíz t/ha	1.08	[89]
Consumo de gas natural (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del gas natural USD/GJ	\$5.33	[116]
Consumo de carbón (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU

Precio del carbón USD/GJ	2.72	[116]
Uso de electricidad (kWh/L etanol)	0.506	Base de datos IFEU
Precio de la electricidad / kWh	0.116	[69]
Subproductos (Granos secos de la destilación GSD) t/t maíz	0.4469	Base de datos IFEU
Precio de los GSD USD/t	\$82.66	[117]

### Datos Económicos Etanol Maíz Medio

Capacidad de planta millones de litros/año	189	
Costo de inversión	\$70,397,500	[115]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$7,039,750	
Inversión año 2 25%	\$17,599,375	
Inversión año 3 30%	\$21,119,250	
Inversión año 4 20%	\$14,079,500	
Inversión año 5 25%	\$17,599,375	
costo total de planta	\$77,437,250	
Operación y mantenimiento (incluyendo costos de enzimas y levadura) USD / año	\$10,043,840	[115]
Vida útil de la planta	25	[115]
Factor de capacidad	0.79	[115]
Rendimiento en planta L/t maíz	433.9	Base de datos IFEU
Volumen utilizado t/año	344,604	
Costo de transporte de maíz 100 km (USD/t)	\$6.8	[69]
costo del maíz (USD/t)	\$194.7	[89]
Costo total de maíz (USD/t)	\$201.6	
Superficie requerida por la planta (ha/año)	64053	
Rendimiento en campo de maíz t/ha	5.4	[89]
Consumo de gas natural (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del gas natural USD/GJ	\$5.33	[116]
Consumo de carbón (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del carbón USD/GJ	2.72	[116]
Uso de electricidad (kWh/L etanol)	0.506	Base de datos IFEU
Precio de la electricidad / kWh	0.116	[69]
Subproductos (Granos secos de la destilación GSD) t/t maíz	0.4469	Base de datos IFEU
Precio de los GSD USD/t	\$82.66	[117]

### Datos Económicos Etanol Maíz Alto

Capacidad de planta millones de litros/año	189	
Costo de inversión	\$70,397,500	[115]
Inversión año 1 planeación del proyecto 10%	\$7,039,750	
Inversión año 2 25%	\$17,599,375	
Inversión año 3 30%	\$21,119,250	
Inversión año 4 20%	\$14,079,500	
Inversión año 5 25%	\$17,599,375	
costo total de planta	\$77,437,250	
Operación y mantenimiento (incluyendo costos de enzimas y levadura) USD / año	\$10,043,840	[115]
Vida útil de la planta	25	[115]
Factor de capacidad	0.79	[115]
Rendimiento en planta L/t maíz	433.9	Base de datos IFEU
Volumen utilizado t/año	344,604	
Costo de transporte de maíz 100 km (USD/t)	\$6.8	[69]
costo del maíz (USD/t)	\$143.2	[89]
Costo total de maíz (USD/t)	\$150.0	
Superficie requerida por la planta (ha/año)	38289	
Rendimiento en campo de maíz t/ha	9	[89]
Consumo de gas natural (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del gas natural USD/GJ	\$5.33	[116]
Consumo de carbón (GJ/L etanol)	0.006	Base de datos IFEU
Precio del carbón USD/GJ	2.72	[116]
Uso de electricidad (kWh/L etanol)	0.506	Base de datos IFEU
Precio de la electricidad / kWh	0.116	[69]
Subproductos (Granos secos de la destilación GSD) t/t maíz	0.4469	Base de datos IFEU
Precio de los GSD USD/t	\$82.66	[117]

## Datos de Empleo

### Horas de labor en la fase agrícola para todos los casos de caña

Actividad	Modalidad	Unidades	Cantidad	Fuente
Clareo	Mecánica	hs/ha	1	Dato de Campo
Arado	Mecánica	hs/ha	1	Dato de Campo
Surcado	Mecánica	hs/ha	0.8	Dato de Campo
Rastreo	Mecánica	hs/ha	0.6	Dato de Campo
Transporte de fertilizantes y herbicidas	Mecánica	hs/ha	2	Dato de Campo
Siembra	Manual	hs/ha	72	Dato de Campo
Fertilización	Manual	hs/ha	5	Dato de Campo
Control de plagas	Manual	hs/ha	5	Dato de Campo
Aplicación de herbicidas	Manual	hs/ha	5	Dato de Campo
Control de maleza	Manual	hs/ha	80	Dato de Campo
Cosecha	Mecánica y manual	hs/ha	140	Dato de Campo
<b>Total</b>			<b>312.4</b>	Dato de Campo

### Datos de empleo y asignación de acuerdo a contenido energético Etanol de Miel C (EMF y EMB)

1 empleo =1800 hrs trabajo		[118]
Asignación al azúcar	90.80%	
Asignación al etanol	9.20%	
Empleos totales en campo por fabrica	2029	Dato de campo
Empleos en campo por fabrica para etanol	187	
Empleos totales fabrica	199	
Empleos de fábrica al etanol	18	[113]
Empleos totales en transportes	50	Dato de campo y supuesto (300 km dist. a mezclado)
Empleos en transporte al etanol	5	
Empleos totales etanol	210	



Empleos/TJ	1.38	
------------	------	--

**Datos de empleo y asignación de acuerdo a contenido energético Etanol de Miel B (EMBF)**

1 empleo =1800 hrs trabajo		[118]
Asignación al azúcar	80.4%	
Asignación al etanol	19.6%	
Empleos totales en campo por fabrica	1044	Dato de campo
Empleos en campo por fabrica para etanol	205	
Empleos totales fabrica	102	
Empleos de fábrica al etanol	20	[113]
Empleos totales en transportes	25	Dato de campo y supuesto (300 km dist. a mezclado)
Empleos en transporte al etanol	5	
Empleos totales etanol	230	
Empleos/TJ	1.52	

**Datos de empleo y asignación de acuerdo a contenido energético Etanol de Jugo directo (EJD y EJDE)**

1 empleo =1800 hrs trabajo		[118]
Asignación al azúcar	0%	
Asignación al etanol	100%	
Empleos totales en campo por fabrica	1073	Dato de campo
Empleos en campo por fabrica para etanol	1073	
Empleos totales fabrica	350	
Empleos de fábrica al etanol	350	[113]
Empleos totales en transportes	51	Dato de campo y supuesto (300 km dist. a mezclado)
Empleos en transporte al etanol	51	
Empleos totales etanol	1474	
Empleos/TJ	9.7	

### Horas de labor en la fase agrícola caso Etanol Maíz Bajo

Actividades	Modalidad	Unidad	Cantidad/ha	Fuente
Barbecho o arada	Mecánico	hs/ha	3	[89]
Rastreo	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Aporque	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Siembra	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Aplicación de insecticidas	Mecánico	hs/ha	0.5	[89]
Aplicación de insecticidas	Mano de obra	hs/ha	32	[89]
Aplicación de herbicidas	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Cosecha	Mano de obra	hs/ha	40	[89]
Pizca	Mano de obra	hs/ha	35	[89]
Desgranado	Mecánico	hs/ha	6	[89]
Encostale	Mano de obra	hs/ha	4	[89]
Total			128.5	[89]

### Datos de empleo y asignación de acuerdo a contenido energético Etanol Maíz Bajo

1 empleo =1800 hrs trabajo		[118]
Asignación al co-producto	45.2%	
Asignación al etanol	54.8%	
Empleos totales en campo por fabrica	22779	Dato de campo
Empleos en campo por fabrica para etanol	12483	
Empleos totales fabrica	35	
Empleos de fábrica al etanol	19	[113]
Empleos totales en transportes	24	Dato de campo y supuesto (300 km dist. a mezclado)
Empleos en transporte al etanol	14	
Empleos totales etanol	12516	
Empleos/TJ	3.06	

### Horas de labor en la fase agrícola caso Etanol Maíz Medio

Actividades	Modalidad	Unidad	Cantidad/ha	Fuente
Chapeo o desvarado	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Barbecho o arada	Mecánico	hs/ha	3	[89]
Surcado	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Rastreo	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Transporte de insumos	Mecánico	hs/ha	1	[89]
Siembra	Mecánico	hs/ha	4	[89]
Siembra	Mano de obra	hs/ha	16	[89]
Surco y siembra	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Aplicación de riego	Mano de obra	hs/ha	28	[89]
Nivelación (Bordeo)	Mecánico	hs/ha	1	[89]
Limpia de canal	Mano de obra	hs/ha	3	[89]
Limpia de regueras	Mano de obra	hs/ha	8	[89]
Aplicación de fertilizantes	Mano de obra	hs/ha	10	[89]
Aplicación de insecticidas	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Aplicación de insecticidas	Mano de obra	hs/ha	15	[89]
Aplicación de herbicidas	Mano de obra	hs/ha	16	[89]
Chapeo o deshierbe	Mano de obra	hs/ha	6	[89]
Acarreo cosecha	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Acarreo cosecha	Mano de obra	hs/ha	12	[89]
Trilla	Mecánico	hs/ha	1	[89]
Pizca	Mano de obra	hs/ha	172	[89]
Desgranado	Mecánico	hs/ha	5	[89]
Encostale	Mano de obra	hs/ha	16	[89]
<b>Total</b>			<b>327</b>	

### Datos de empleo y asignación de acuerdo a contenido energético Etanol Maíz Medio

1 empleo =1800 hrs trabajo		[118]
Asignación al co-producto	45.2%	
Asignación al etanol	54.8%	
Empleos totales en campo por fabrica	11647	Dato de campo
Empleos en campo por fabrica para etanol	6382	
Empleos totales fabrica	35	
Empleos de fábrica al etanol	19	[113]
Empleos totales en transportes	24	Dato de campo y supuesto (300 km dist. a mezclado)
Empleos en transporte al etanol	14	
Empleos totales etanol	6416	
Empleos/TJ	1.57	

### Horas de labor en la fase agrícola caso Etanol Maíz Alto

Actividades	Modalidad	Unidad	Cantidad/ha	Fuente
Barbecho o arada	Mecánico	hs/ha	2.5	[89]
Surcado	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Rastreo	Mecánico	hs/ha	4	[89]
Aporque	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Transporte de insumos	Mecánico	hs/ha	2	[89]
Siembra y fertilización	Mecánico	hs/ha	2.5	[89]
Aplicación de riego	Manual	hs/ha	36	[89]
Consumo de agua			1	[89]
Limpia de canal	Manual	hs/ha	18	[89]
Aplicación de fertilizantes	Manual	hs/ha	12	[89]
Aplicación de insecticidas	Mecánico	hs/ha	4	[89]
Aplicación de herbicidas	Manual	hs/ha	12	[89]
Trilla y acarreo	Mecánico	hs/ha	2	[89]
<b>Total</b>			<b>100</b>	[89]

### Datos de empleo y asignación de acuerdo a contenido energético Etanol Maíz Alto

1 empleo =1800 hrs trabajo		[118]
Asignación al co-producto	45.2%	
Asignación al etanol	54.8%	
Empleos totales en campo por fabrica	2127	Dato de campo
Empleos en campo por fabrica para etanol	1166	
Empleos totales fabrica	35	
Empleos de fábrica al etanol	19	[113]
Empleos totales en transportes	24	Dato de campo y supuesto (300 km dist. a mezclado)
Empleos en transporte al etanol	14	
Empleos totales etanol	1199	
Empleos/TJ	0.29	

## Datos para el cálculo del indicador Iua [106-110]

### Etanol de caña, todos los casos (Veracruz)

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Vel. Viento km/día	No. De horas de sol horas	ETo mm/día	Precipitación mm
Enero	21.2	10.5	76.5	95	4.51	2.1	39.18
Febrero	22.5	11.4	72.8	103.7	4.7	2.51	32.15
Marzo	24.7	13.1	68.8	129.6	4.65	3.1	32.15
Abril	26.9	15.2	66.7	112.3	4.19	3.38	38.31
Mayo	27.2	15.9	69.8	103.7	3.89	3.38	96.34
Junio	26.4	16.2	77.5	103.7	4.39	3.32	164.6
Julio	25.4	15.2	78.6	77.8	4.73	3.24	167.2
Agosto	25.9	15.4	77.1	60.5	5.05	3.27	160.4
Septiembre	25.4	15.8	80.6	69.1	4.26	2.94	160.7
Octubre	23.9	14.8	81	60.5	4.62	2.64	136
Noviembre	22.5	12.4	79.5	60.5	4.4	2.19	66.76
Diciembre	21.6	11.1	76.7	69.1	4.4	1.98	40.04

### Etanol de Maíz Bajo (Colima)

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Vel. Viento km/día	No. De horas de sol horas	ETo mm/día	Precipitación mm
Enero	31.1	15.6	58	129.6	6.46	3.25	23.08
Febrero	32.1	15.8	56.6	172.8	7.42	4.07	5.94
Marzo	33.4	15.8	53.2	198.7	7.07	4.73	8.87
Abril	34.7	17.3	51.1	190.1	6.17	4.96	0
Mayo	34.9	19.5	53.8	190.1	5.18	4.93	12.73
Junio	33.3	21.6	67.8	190.1	4.54	4.32	121.44
Julio	32.3	21.2	73.7	181.4	4.38	3.95	153
Agosto	32.1	21.1	75.1	207.4	4.78	3.99	149.8
Septiembre	30.9	21.2	78.3	233.3	4.08	3.56	149.8
Octubre	31.5	20.3	74.4	172.8	5.14	3.51	83.32
Noviembre	32	18.1	66.5	138.2	6.33	3.37	30.36
Diciembre	30.9	16.6	61.9	112.3	5.69	2.91	17.48

### Etanol de Maíz Medio (Michoacán)

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Vel. Viento km/día	No. De horas de sol horas	ETo mm/día	Precipitación mm
Enero	22.5	6.5	63.8	172.8	5.7	13.89	17.48
Febrero	24	7.4	59.4	207.4	6.84	17.03	8.87
Marzo	26.5	9.6	51	207.4	6.79	18.74	9.84
Abril	28.2	11.7	54.8	190.1	6.27	19.04	10.81
Mayo	28.7	13.6	53.7	190.1	6.03	18.95	40.04
Junio	26.7	14.4	66.9	190.1	5.23	17.7	106.41
Julio	24.4	13.7	70.5	164.2	5.12	17.49	126.44
Agosto	24.2	13.5	70.2	155.5	5.78	18.28	120.01
Septiembre	24.4	13.3	74.6	164.2	4.98	16.36	96.34
Octubre	24.3	10.9	71.6	146.9	5.97	16.36	48.51
Noviembre	23.8	8.4	69.2	155.5	6.15	14.85	14.64
Diciembre	22.4	7.1	70.7	164.2	5.33	12.89	11.77

### Etanol de Maíz Alto (Guanajuato)

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Vel. Viento km/día	No. De horas de sol horas	ETo mm/día	Precipitación mm
Enero	21.7	7.1	50	207.4	7.27	3.07	16.54
Febrero	23.1	7.9	38.4	224.6	8.33	4.01	8.87
Marzo	25.8	9.8	37	250.6	8.64	4.95	9.84
Abril	28.3	12.1	36.7	241.9	8.35	5.5	12.73
Mayo	29.5	14	42.5	241.9	7.86	5.56	34.81
Junio	27.7	14.7	56.2	259.2	6.94	4.91	95.72
Julio	26	14.1	62.7	233.3	6.84	4.36	118.06
Agosto	26.3	14	62.8	224.6	7.57	4.36	108.64
Septiembre	25.1	13.7	63.6	216	6.76	3.96	101.19
Octubre	24.8	11.6	58.2	216	7.69	3.82	37.44
Noviembre	23.5	9.1	50.7	216	7.77	3.46	14.64
Diciembre	21.5	8	56.5	198.7	6.7	2.78	13.69

## Etanol de Sorgo Medio y Alto

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Vel. Viento km/día	No. De horas de sol horas	ETo mm/día	Precipitación mm
Enero	26	8.9	62.5	103.7	4.9	2.21	16.54
Febrero	28	10.8	60.4	121	5.68	2.84	18.42
Marzo	31.5	13.4	58	129.6	6.11	3.68	15.59
Abril	34	17.3	55.2	138.2	6.47	4.52	32.15
Mayo	35.8	19.8	58	121	7.37	4.91	47.67
Junio	36.7	21.5	56.8	112.3	7.53	5.14	82.63
Julio	36.8	20.9	56.1	77.8	7.47	4.82	60.6
Agosto	37.6	21	56.9	95	7.21	4.84	71.24
Septiembre	34.9	20.3	58	86.4	6.31	4.18	123.3
Octubre	32.3	16.9	58.2	95	6.48	3.6	66.76
Noviembre	29.2	12.7	56.5	95	5.59	2.82	34.81
Diciembre	26.4	9.7	59.3	95	5.36	2.26	24

## ANEXO B

### Artículos publicados



## Air emissions scenarios from ethanol as a gasoline oxygenate in Mexico City Metropolitan Area

Carlos A. García<sup>a</sup>, Fabio Manzini<sup>b,\*</sup>, Jorge Islas<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Posgrado en Ingeniería Energética, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Apartado Postal 34, 62580 Temixco, Morelos, Mexico

<sup>b</sup> Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Apartado Postal 34, 62580 Temixco, Morelos, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 20 May 2010

Accepted 13 July 2010

#### Keywords:

Air pollution

Mexico City

Ethanol blendings

Emission factors

Gasoline oxygenate

Emission standards

### ABSTRACT

The Mexican Biofuel Introduction Program states that during year 2010 the three biggest Mexican cities will have a gasoline blending with 6% ethanol available for all gasoline on-road vehicle fleet. Also in 2010 Mexican government has programmed to start the substitution of Tier 1 – the adopted US emission standards – by Tier 2, which are more stringent emission standards for motor vehicles and gasoline sulfur control requirements. How will the air emissions in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) be modified by using this blending? Four scenarios up to year 2030 were constructed and simulated using the Long-Range Energy Alternatives Planning model. Beginning with a BAU or reference scenario, in this scenario the current available fuel is a blending composed by 5% methyl tertiary butyl ether and 95% gasoline (MTBE5). Then, three alternative scenarios that use ethanol as an oxygenate are considered, one with the already programmed E6 blending (6% anhydride ethanol, 94% gasoline), for the sake of comparison the E10 blending (10% anhydride ethanol, 90% gasoline), and the other alternative to compare, ETBE13.7 (13.7% ethyl tertiary butyl ether, 86.3% gasoline; where ETBE is an ether composed by 48% anhydride ethanol and 52% isobutene). Emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), particulate matter (PM<sub>10</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), total hydrocarbons (THC), benzene, formaldehyde, acetaldehyde and 1,3-butadiene were calculated using emission factors previously calculated using the adapted US-EPA computer model called MOBILE6-Mexico. Results show that Tier 1 and Tier 2 standards effectively lowers all emissions in all studied scenarios with the exception of PM<sub>10</sub> and CO<sub>2</sub> emissions. The alternative scenario E10 has the most total avoided emissions by weight but it is not the best when considering some individual pollutants. The greatest environmental benefit of ethanol in its final use as a gasoline oxygenate is for avoiding CO<sub>2</sub> emissions.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### Contents

1. Introduction . . . . .	3033
2. Scenario construction . . . . .	3034
2.1. Evolution of the vehicle fleet . . . . .	3034
2.2. Air emissions calculation . . . . .	3035
2.3. Emission factor calculations . . . . .	3035
3. Results . . . . .	3036
3.1. Calculated emission factors . . . . .	3036
3.2. Number of vehicles . . . . .	3038
3.3. Energy consumption . . . . .	3038
3.4. Air pollutant emissions . . . . .	3038
4. Discussion . . . . .	3039
5. Conclusions . . . . .	3039
Acknowledgements . . . . .	3039
References . . . . .	3039

\* Corresponding author. Tel.: +52 55562 29704; fax: +52 55562 29791.  
E-mail address: [fmp@cie.unam.mx](mailto:fmp@cie.unam.mx) (F. Manzini).



## 1. Introduction

Atmospheric emissions of polluting agents in urban centers are directly related to negative health effects in its inhabitants [1]. According to an evaluation of the World Health Organization [2], every year, more than two million premature deaths in urban areas can be attributed to the exhaust gases of fossil fuels. According to Fuglestvedt et al. [3], transport sector is the most important worldwide source of exhaust gases of fossil fuels, principally nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) 37%, total hydrocarbons (THC) 19%, carbon monoxide (CO) 18%, sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) 2% [4] and particulate matter (PM<sub>10</sub>) 6% [5]. Finally, it contributes worldwide to the liberation of 21% of total carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions.

Mexico City Metropolitan Area (MCMA) is not exempted from this environmental problem. Not less than 40% of urban population is exposed to air pollution levels above standards [6]. According to [7], in 1994 airborne contamination through particles and tropospheric ozone could cause 4919 deaths in MCMA. Mobile sources contributed with this problem with 19% of the 31,380 tonnes of particulate matter (PM) in that year [8]. In addition, transport sector in MCMA is the main source of antropogenic emissions of CO<sub>2</sub> (56%), CO (99%) and NO<sub>x</sub> (82%), primarily due to on-road vehicles [9–11]. This air quality deterioration causes respiratory and cardiovascular diseases [12], attributed to the synergetic action of the following criteria pollutants: particulate matter smaller than 10 μm (PM<sub>10</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and hydrocarbons (HC) (these last three are also tropospheric ozone precursors); toxic polluting agents like: benzene, 1,3-butadiene, formaldehyde and acetaldehyde. In total the MCMA transport sector contributes with 57% of total emissions due to fossil fuel combustion [11].

Worldwide actions have been taken to reduce vehicle polluting emissions and consequently decrease their effects in human health, such as standards and energy efficiency regulations, fuel quality control, introduction of more demanding emissions standards and introduction of vehicles with new technologies and alternative fuels [6]. Energy efficiency regulations consider an increase in the fuel economy. Examples of these regulations are the Corporate Average Fuel Economy (CAFE) regulations in the USA. Fuel control refers to lead and sulfur content in fuels, as well as to limit the Reid Vapor Pressure (RVP) in order to reduce the evaporative emissions. In particular it is expected a shift toward low-CO<sub>2</sub> fuels as ethanol [13] and the adoption of new vehicle technologies beginning with hybrids, plug-in hybrids, and transitioning to hydrogen fuel cell and battery electric vehicles over time [14–16].

The emission standards for each type of vehicle that limit the amount of pollutant emissions are being fulfilled by installing emission control technologies, like the catalytic converter, which is the most widely used technology. Generally, the standards are dynamic, they keep evolving to more demanding standards that limit in an important way the air emissions.

Regarding new fuels available for air emissions mitigation, this option can replace completely or partially fossil fuels: gasoline and diesel. The search of new fuels must take into account, besides the problem of the atmospheric emissions, the problem of high oil dependency as a unique energy source for motor vehicles and additionally, the problem of the petroleum production decline [17]. Due to these reasons, the alternative fuels must reduce GHG emissions and their effects on the global warming of the planet and look for the sustainability of raw materials from which they will be obtained.

Ethanol is the most widely used alternative fuel in the transport sector, particularly in Brazil and the United States. It has been proposed to replace gasoline in a partial or complete way. The

lowering GHG emissions. These reasons have been used to justify the fiscal incentives to the producers and the promulgation of energy bills for the promotion and the use of the ethanol throughout the world [13].

Ethyl alcohol or ethanol is a well known alcohol that can be obtained chemically from ethylene, a product of oil refinement, from ethane, a natural gas component or biologically through fermentable sugars, derived typically from starch crops, cellulose and other forms of vegetal biomass [18]. Due to the fact that ethanol can be produced from biomass, this biofuel has a renewable character. From now on, it will be assumed that the ethanol referred in this study is from biological origin, produced from crops or another organic material.

The findings of studies examining the use of ethanol as a gasoline substitute to reduce GHG emissions in the transport sector have been positive consensated. Nguyen et al. [19] affirms that ethanol can be produced in a renewable manner either if it is produced from cultivated crops as sugarcane or from cellulosic residues. However, there is a debate in whether or not ethanol can contribute to air pollution reduction as a gasoline substitute. The role of new emission control technologies incorporated into these studies is crucial. There are many studies and compilations on the atmospheric emissions from vehicles that use different volumetric ethanol-gasoline blendings [20–28], that present variable and sometimes contradictory results among them. Nevertheless, Schifter work [20] is crucial for the present article because he obtained experimentally emission factors of ethanol-gasoline blendings in Mexico City. In addition, the effect of emission standards and vehicle fleet renewal has not been explored in the great majority of these studies.

In the 1980s there were many urban air pollution problems in Mexico due to leaded gasoline, the national measure adopted in 1988 was the use of unleaded reformulated gasoline, after that the tendency has been to reduce the sulfur content in gasolines and diesel. In some Mexican urban centers vehicle inspection and maintenance programs were adopted, as well as improvements in road infrastructure [6], in particular in MCMA. In Mexico City since 1992 the local government has adopted through four air quality improvement programs – where PROAIRE 2002–2010 is the latest one [29] – many different actions like: restrictions on the use of vehicles older than 10 years to 1 day per week; renewal of public transport fleet, from small and medium-sized transit to high capacity public transportation; promotion of second story upper-deck freeways; implementing self-regulating programs to control pollutant emissions from industry sources, and finally the implementation of a gasoline vapor recovery program at all gasoline refueling stations [30].

Since 1999 Mexico has adopted the emission standards for motor vehicles previously applied to the United States called Tier 1 [31]. In the USA Tier 1 standards were designed to control criteria air pollutants in exhaust gases emitted from automobiles and light trucks (SUVs, pickup trucks, and minivans), and were used in the USA until 2004. Afterwards, from 2004 to 2009 Tier 2 was phased in, which consisted in a vehicle and gasoline sulfur program to control air pollution from motor vehicles by setting emissions standards and gasoline sulfur content requirements [32]. It has been proved that by lowering the average sulfur content of gasoline from 120 ppm to 30 ppm, emissions of tropospheric ozone precursors NO<sub>x</sub> and THC are also reduced [33]. Mexico has plans to adopt also Tier 2 standards, initially this adoption was programmed to enter into force by 2010, however the exact date will depend on the availability of ultra low sulfur gasolines. Pemex, the national oil company recently declared that they will not be capable to refine those gasolines before year 2015 [34].

government in 1988, some studies were performed [35], but that initiative was not realized. Nevertheless, in 2008 the “Law for the Promotion and Development of Biofuels” [36] mandates that the use of biodiesel and ethanol in motor vehicles has to be implemented through a Biofuels Introduction Program finally published in 2009 [37]. This program states that ethanol will be used as a gasoline oxygenate in a 6% volume proportion – known as E6 – and will be distributed in 3 major cities: Guadalajara (by the end of 2011), Monterrey and Mexico City and its metropolitan area by the end of 2012. It is worth to mention that this program does not involve the sugar cane production that is currently used for sugar production.

The purpose of this study is to determine the atmospheric emissions in the MCMA produced by the expected on-road gasoline motor vehicle fleet up to 2030, due to the combustion of current available gasoline (MTBE5) as a reference scenario and three ethanol oxygenates blendings in alternative scenarios E6, E10 and ETBE13.7. E6 was chosen because it is the official ethanol blending being introduced by the national program, E10 is the most widely used ethanol blending in the world and ETBE13.7 is the most easily substitutable blending, just by substituting MTBE by ETBE. Four long-range scenarios were constructed considering the restrictions involved in the American Air emission standards Tier 1 and Tier 2 that had been adopted or will be adopted by the Mexican government. All scenarios were simulated using LEAP model to obtain the evolution of the vehicle fleet, its energy consumption and polluting emissions. The polluting emissions were computed with the input of emissions factors data previously calculated with MOBILE6-Mexico for toxic air pollutants (benzene, formaldehyde, acetaldehyde and 1,3-butadiene), criteria air pollutants (carbon monoxide, nitrogen oxides, particles, sulfur dioxide and total hydrocarbons), and carbon dioxide the most important greenhouse gas.

## 2. Scenario construction

In this study the constructed scenarios represent a possible evolution of the motor vehicle fleet of the MCMA from year 2002 to year 2030. All scenarios are constructed considering the current emission control regulation Tier 1 until 2010, and thereafter Tier 2 regulation standard is programmed to enter into force, nevertheless the exact moment in which Tier 2 will be applied depends completely on the availability of gasoline with low sulfur content in Mexico.

The description of a possible future and its associated trajectory constitutes a scenario. Scenarios represent different images from future, constructing these future images helps us understand how the decisions and the actions taken today can have influence in the future. The scenario technique is an instrument of the prospective that allows reducing the degree of uncertainty in the decision-making. The uncertainty about the future evolution of the socioeconomic systems is absolutely inevitable. This is the reason why it is only possible to realize reconnaissance exercises of the future [38].

General assumptions:

- Year 2002 is considered the base year.
- The structure of the transport sector motor vehicle fleet in 2002 for the MCMA remains constant until 2030.
- The annual average growth rate (AAGR) of gasoline vehicles sales in the MCMA is 3%, that is the historical tendency from 1993 to 2003 [39].
- The survival profile is the same for all types of gasoline vehicles.
- The annual mileage traveled by each type of gasoline vehicle in the MCMA will stay constant in all the period.

The process of scenario construction begins with the construction of the reference scenario, also known as Business As Usual

MTBE and 95% gasoline in percentage of volume). The MTBE (Metil Tertiary Butilene Ether) is the actual oxygenate in the gasoline consumed in the MCMA [20]. This article analyzes the substitution of MTBE by ethanol, which will be considered as the gasoline oxygenate in three alternative scenarios. In the first, all gasoline motor vehicles will use E6 (6% anhydrous or dehydrated ethanol and 94% gasoline in percentage of volume) [37]. In the second alternative scenario, ethanol is used as part of the compound ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether), which actually contains 48% ethanol and 52% isobutene. And the blending used in all gasoline motor vehicles is ETBE13.7 (13.7% ETBE and 86.3% gasoline in percentage of volume). This blending percentage was chosen because it fulfills the maximum allowed oxygen required by the Mexican standards [40], which differ from ETBE15, a 15% ETBE blending, as are actually being used in France and Spain. Using this blending some of the disadvantages of handling anhydrous ethanol are eliminated (because it is highly hygroscopic), and the actual infrastructure used for MTBE production can be easily converted to ETBE production [41].

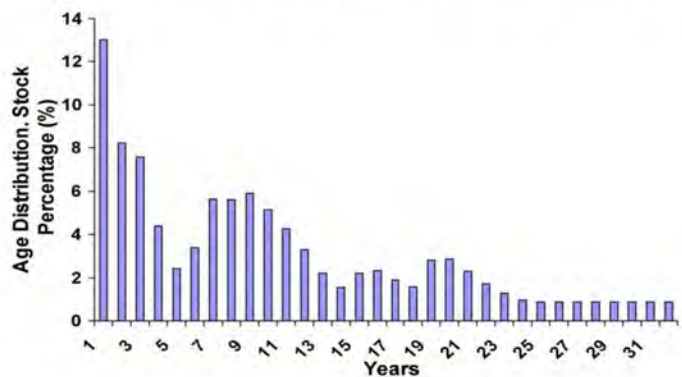
In the third alternative scenario all gasoline motor vehicles will use E10 (10% anhydrous ethanol and 90% gasoline in percentage of volume), is one of the most used ethanol blending in the world, although this blending exceeds the maximum oxygen percentage stated in the Mexican law, 3.5 wt%, while the norm states 2.0 wt% as maximum [40]. This scenario is expected to show benefits when compared with the reference and other alternative scenarios.

All scenarios were constructed and simulated in LEAP model version 2006.35 developed by the Stockholm Environmental Institute – Boston. This model is a computer platform designed to carry out an energy-environmental planning in integrated form.

### 2.1. Evolution of the vehicle fleet

The evolution of the on-road gasoline vehicle fleet depends on three factors. First, it is determined by the existing number of vehicles in the base year. The second factor is a function of the specification of a lifetime profile that describes the age distribution of the vehicles within the period of analysis. This profile determines the vehicles that leave circulation by their antiquity. The third factor is the expected sales of new vehicles which is assumed to grow at an average annual rate of 3% as mentioned earlier. The selected base year was 2002 because was the last year where the evolution of the on-road motor vehicle fleet was reported every 2 years by vehicle type since 1994 – data needed to obtain the survival profile ( $F$ ) [8]. Fig. 1 shows the age distribution of the gasoline vehicle fleet in the MCMA.

In order to obtain the number of gasoline vehicles or vehicle stock ( $N$ ) that circulate in the MCMA data from the Inventory of



emissions 2002 was used [8]. According to this source in this year 3,420,887 gasoline vehicles were registered in the MCMA, this number represents the 95.3% of the total, the diesel engine vehicles represent 3.7%, and the other vehicles are GLP and GN vehicles. Finally, the gasoline vehicles sales were 336,947 vehicles in that year.

The vehicle stock in the subsequent years depends on the sales and the survival profile which are related by Eq. (1).

$$N_{m,y,v} = S_{m,v} F_{m,y-v} \quad (1)$$

where  $N$  is the stock or number of vehicles existing in a particular year,  $S$  are the sales, or the number of vehicles added in a particular year,  $F$  is the survival profile, that is to say the fraction of surviving vehicles of type  $m$  after a calendar year  $y$ , of model vehicle year  $v$  or vintage.

The survival profile is defined by Eqs. (2) and (3).

$$F(t) = F(t-1) e^{Kt} \quad (2)$$

where

$$K = \frac{\ln F(t) - \ln F(t-1)}{t} \quad (3)$$

The value of constant  $K$  was obtained by taking into account the values of the number of vehicles sold in a year and its evolution in the inventories of the fleet of subsequent years ( $t$ ). For Light Duty Gasoline Vehicles (LDGV) case,  $K = -0.0284$ . Fig. 2 shows the resulting survival profile.

Table 1 shows the classification of the MCMA inventory type of vehicle groupings [8] as input data in the MOBILE-6 Mexico model. The grouping criterion was their gross weight rating [42].

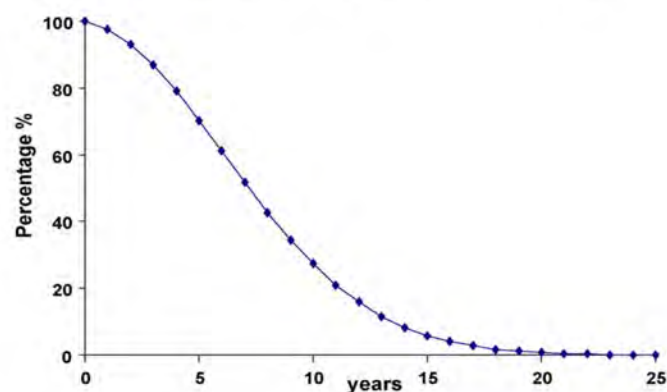
Once determined the quantity of vehicles by type and fuel, it was necessary to determine its activity level of the vehicle fleet. Table 2 shows the average annual mileage of each type of vehicle presented in the MCMA emissions inventory [8].

The annual energy consumption of each vehicle type and fuel scenario was calculated in LEAP by multiplying the existing vehicle stock in the year  $t$ , their annual mileage (in km), and the fuel economy in (L/km).

## 2.2. Air emissions calculation

For each type of vehicle and fuel scenario, LEAP uses Eq. (4) to determine the annual emissions of criteria air pollutants: nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), total hydrocarbons (HC) and particles smaller to 10 μm (PM10); and toxic air pollutants: benzene, 1,3-butadiene, formaldehyde and acetaldehyde, and the main greenhouse gas (GHG), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).

$$Emission_{m,y,v,i} = Stock_{m,y,v} \times Mileage_{m,y,v} \times EmissionFactor_{m,v,i} \quad (4)$$



**Table 1**

Vehicle classification, stock and participation of on-road gasoline motor vehicles in the MCMA in 2002.

Vehicle type	Vehicle number	Participation (%)	
MOBILE6-Mexico	MCMA inventory		
LDGV	Private automobiles	2,707,418	79.1%
	Taxis	115,972	3.4%
LDGT1	SUV	19,485	0.6%
	Pick Up	173,422	5.1%
LDGT2	Micro-buses	24,087	0.7%
HDGV	3t vehicles	243,809	7.1%
	Trucks	100	0.003%
	Buses	247	0.007%
	>3t vehicles	41,910	1.2%
MC	Motorcycles	94,437	2.8%
Total		3,420,887	100.0%

LDGV: Light Duty Gasoline Vehicles; LDGT1: Light Duty Gasoline Trucks; LDGT2: Light Duty Gasoline Trucks; HDGV: Heavy Duty Gasoline Vehicles ( $\geq 3$  tonnes); MC: motorcycles. Source: [8,42].

where  $Stock$  is the number of vehicles existing in a particular year,  $Mileage$  is the annual distance traveled per vehicle,  $EmissionFactor$  is the emissions rate for pollutant  $p$ , and  $i$  is the pollutant (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCT, PM10, benzene, acetaldehyde, formaldehyde, 1,6-butadiene).

The emission factors depend highly on local parameters, then in this article its calculation is done independently using MOBILE6-Mexico model and then introduced into LEAP model as input data.

## 2.3. Emission factor calculations

An emission factor is defined as an average value of the ratio of polluting air emission by its activity unit, consequently, the polluting emissions from motor vehicles are calculated using emission factors of each polluting agent multiplied by the mileage of each type of automotive vehicle. The emission factors units are related commonly to the mass of the polluting agent by activity unit, expressed in grams by kilometer.

The emission factors of on-road motor vehicles are obtained generally from computer models, because automotive vehicles emissions are more complex and dynamic than the ones originated from fixed sources. The calculation of these emission factors involves several parameters, for example, changes in fuel formulation, vehicle's average speed, emissions control technology, average temperature and the sea level altitude.

To calculate emission factors we have chosen MOBILE 6 model, which is one of the most used programs to compute emission factors in the transport sector worldwide. It was originally created in the mid-1970s by the US EPA (Environmental Protection Agency). The latest version is called MOBILE 6 created in year 2000. In 2003 a version of MOBILE6 adapted to the local conditions of the largest Mexican cities was developed, called MOBILE6-Mexico [42].

**Table 2**

Annual average mileage (in km) for each vehicle type [8].

Vehicle type	Mileage/year
LDGV	36,500
LDGT1	43,800
LDGT2	73,000
HDGV	17,958
MC	12,045

**Table 3**  
Mexican regulation standard for mobile sources and fuel properties entered in MOBILE6-Mexico and LEAP models.

Fuel property	MTBE5	E6	E10	ETBE13.7	Mexican regulation standard NOM-086
Reid Vapor Pressure (RVP) (lb/in. <sup>2</sup> )	7.27 <sup>a</sup>	7.69 <sup>a</sup>	8.03 <sup>a</sup>	6.8 <sup>b</sup>	7.8 max <sup>c</sup>
Sulfur Tier 1 (ppm)	390 <sup>c</sup>	640 <sup>a</sup>	327	390	
Sulfur Tier 2 (ppm)	30 <sup>c</sup>	30 <sup>c</sup>	30 <sup>c</sup>	30 <sup>c</sup>	
Aromatic (vol.%)	25 <sup>a</sup>	24.8 <sup>a</sup>	27.1 <sup>a</sup>	22 <sup>b</sup>	25 <sup>a</sup>
Olefin (vol.%)	10.2 <sup>a</sup>	10.9 <sup>a</sup>	11.7 <sup>a</sup>	4 <sup>b</sup>	10 <sup>a</sup>
Benzene (vol.%)	1.1 <sup>a</sup>	1.1 <sup>a</sup>	1.1 <sup>a</sup>	0.8 <sup>b</sup>	1 <sup>a</sup>
Oxygen (vol.%)	1.0 <sup>a</sup>	2.0 <sup>a</sup>	3.7 <sup>a</sup>	2.1 <sup>b</sup>	2–2.7 <sup>a</sup>
CO <sub>2</sub> emission factor (kg/GJ)	69.3	67.9	62.4	64.7	
Net Energy Content (GJ/tonne)	44.800	43.984	43.635	43.984	

<sup>a</sup> Adapted from [20].

<sup>b</sup> Adapted from [22].

<sup>c</sup> Adapted from [8].

**Table 4**  
Resulting emission factors of CO (g/km) in two calendar years 2008 and 2020 according to the applied emission control standard (Tier 1 or Tier 2), for all the types of vehicles and all fuel scenarios.

Vehicle type	Tier 1 (2008)				Tier 2 (2020)			
	MTBE5	E6	E10	ETBE13.7	MTBE5	E6	E10	ETBE13.7
LDGV	15.22	14.66	14.02	14.74	9.58	9.44	9.38	9.49
LDGT1	13.70	13.29	12.69	13.29	8.59	8.91	8.83	8.91
LDGT2	20.18	19.33	18.04	19.33	10.36	10.29	10.16	10.29
HDTV	37.04	34.66	31.06	34.65	34.38	33.47	31.25	33.46
MC	15.46	14.37	12.91	14.44	15.46	14.37	12.91	14.44

The MOBILE6-Mexico emission factor model consists of an application program that generates emission factors for the entire listed vehicle classifications (Table 1). The model, besides considering regional climatic and geographic conditions, includes parameters as driving habits and vehicle fleet particular characteristics. In the case of Mexico the last two parameters are very similar in the whole country. MOBILE6-Mexico model has been widely applied by the main governmental authorities – SEMARNAT and SMA – to develop the on-road mobile sources part of the National, State and City emissions inventory [8,43].

In this work the Mobile6-Mexico model is used to generate emission factors of four different gasoline blending scenarios to be used by the MCMA on-road motor fleet: MTBE5, E6, E10, and ETBE13.7. The pollutants considered are: hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NOx), particles smaller than 10 μm (PM10), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), benzene, 1,3-butadiene, acetaldehyde and formaldehyde.

We have assumed that the structure of the on-road gasoline motor vehicle fleet in 2002 remains constant until 2030, and during that period emission factors will vary and will be generated considering first the current standard Tier 1 and then from 2010 Tier 2 will enter into force. The model was fed with the following common local input data: temperature variation from 12 °C to 26 °C, altitude 1700 m above sea level, July was the calculated month because its values are very close to the annual average values for all pollutants [44], the fleet average speed 32.9 km/h [8], the emission standards (Tier 1 and Tier 2) and fuel properties shown in Table 3.

Table 3 shows the fuel properties entered MOBILE6-Mexico as input data. These fuel properties change in each simulation of MOBILE6-Mexico according to the fuel being simulated. The temperature values and altitude for the MCMA were the same for all simulations.

### 3. Results

#### 3.1. Calculated emission factors

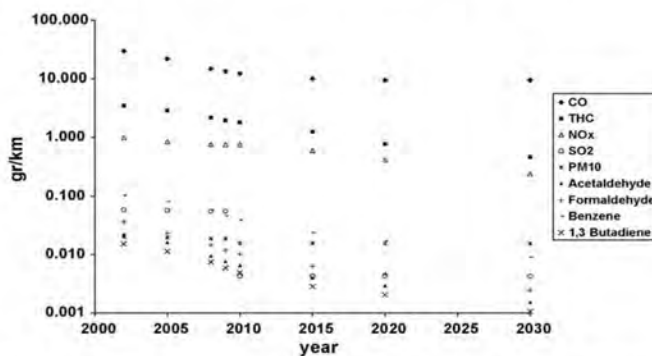
The resulting time average emission factors for each vehicle

dates of application of the current emissions standard – Tier 1 until 2010 and Tier 2 after 2010.

As every model, MOBILE6-Mexico has limitations, among them are that the basic rates of emission of the model are based on a relatively small group of emission tests. In particular, the emissions tests were held in great metropolitan areas, therefore future updates must consider conduction tests in rural areas. MOBILE is a model developed basically to make emissions inventories, nevertheless, has been used in works to study future emissions [26].

As an example, Table 4 shows CO emission factors for every ethanol-gasoline blending. The values are the existing ones in the base year 2002 for Tier 1 and 2010 for the Tier 2. There is a similar table for each pollutant.

The emission factors by pollutant, type of vehicle and scenario, were calculated for the base year 2002 and intermediate years 2005, 2008, 2009, 2010, 2015, 2020 and 2030. For example, Fig. 3 shows for E6 ethanol-gasoline blending scenario, the emission factors of all selected pollutants used or produced by LDGV – that represent the 82.5% of the vehicle fleet in the MCMA.



**Fig. 3.** Fleet average emission factor profiles of selected air pollutants calculated for the period 2002–2030 with MOBILE6-Mexico Model for light loading vehicles.

Fig. 3 shows, in the case of E6 scenario, that most pollutant emission factor profiles decrease during the first years – time period where the emission control technology introduced through Tier 1 is effective except for NOx emissions. After 2010 – when Tier 2 is programmed to enter into force – all emission factors decrease until 2030, but NOx, THC and toxic pollutants do in a more significant way. This behavior, that is very similar in the other

scenarios, is explained because the emission factors according to MOBILE6-Mexico – in which fleet renewal is also considered – are calculated as a fleet average between new vehicles – that satisfy Tier 2 standards – and old vehicles that don't. In contrast with this curve behavior, the SO<sub>2</sub> emission factor profile differ drastically due to the introduction of low sulfur gasoline mandated also by Tier 2, where the gasoline sulfur content must be reduced from

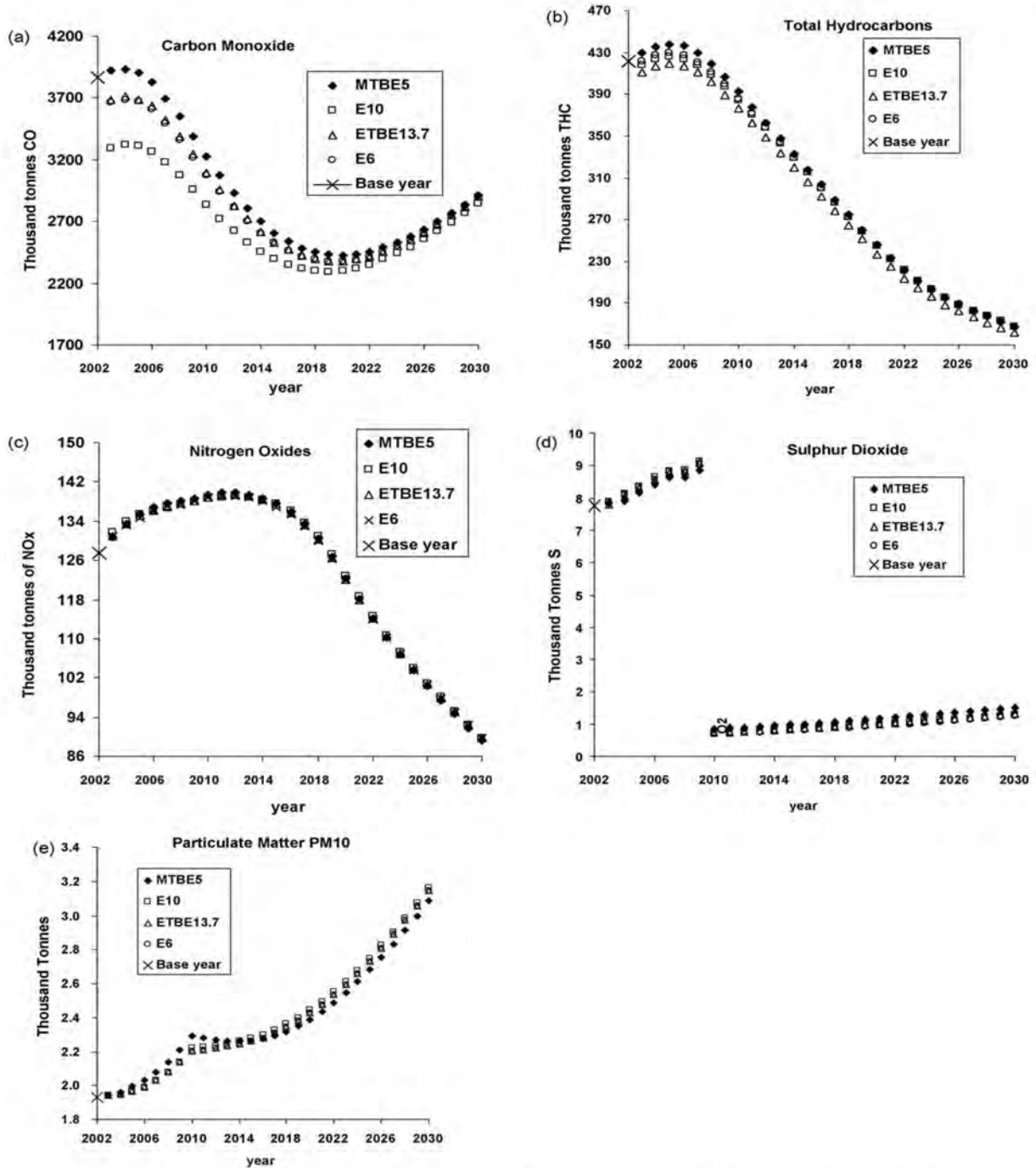


Fig. 4. Estimated annual criteria air emissions from the gasoline on-road motor vehicle fleet in the MAMC (a) CO, (b) THC, (c) NOx, (d) SO<sub>2</sub>, and (e) PM10 in four different fuel

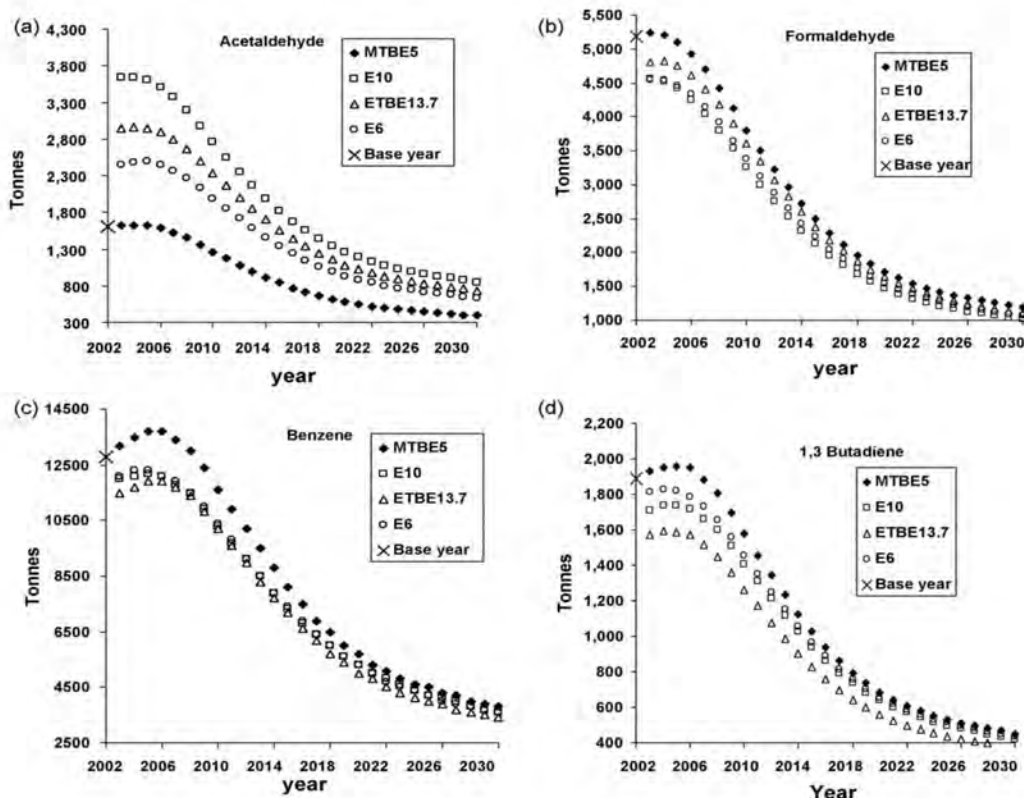


Fig. 5. Estimated annual toxic air emissions from the gasoline on-road motor vehicle fleet in the MCMA (a) acetaldehyde, (b) formaldehyde, (c) benzene, and (d) 1,3-butadiene in four different fuel scenarios (MTBE5, E6, E10 and ETBE13.7).

120 ppm to 30 ppm – average values – in the MCMA. These profiles show similar behavior when compared to the experimental values presented by Schiffer et al. [20] for the MCMA for vehicles using an E6 ethanol-gasoline blending.

3.2. Number of vehicles

Due to the constant rate of annual average growth (of the five vehicle types) *N* increases almost linearly from 3.42 million vehicles in 2002 to 7.87 million of on-road gasoline vehicles in the MCMA in the year 2030.

3.3. Energy consumption

The power consumption also increases almost linearly, it is so because its direct proportionality to the vehicle fleet *N* and mileage being both the same in all scenarios. The gasoline on-road vehicles consumed 562 petajoules in 2002 and in 2030 the fleet consumption would raise up to 1293 petajoules.

3.4. Air pollutant emissions

Figs. 4–6 show the annual emissions of the analyzed air pollutants in MCMA from 2002 to 2030 in four fuel scenarios; Table 5 shows the accumulated emissions for all considered pollutants and their percentages of avoided emissions from the alternative scenarios when compared to the reference scenario. The analyzed air pollutants are classified in criteria pollutants (Fig. 4) toxic

From the analysis of accumulated emissions of the most important direct pollutants from all scenarios in the period 2002–2030, Table 5 shows that CO<sub>2</sub> is by far the most emitted pollutant by gasoline on-road motor vehicles in the MCMA with 94.81% of all emissions pollutants by weight (1,826,172 thousand million tonnes CO<sub>2e</sub> in the MTBE5 reference scenario, in the alternative scenarios the proportions are similar), criteria pollutants participate with 5.17%, and toxic pollutants amount 0.02% of all emissions.

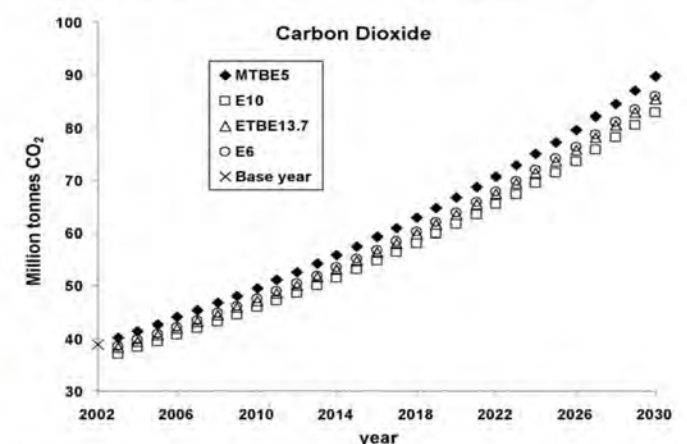


Fig. 6. Estimated annual CO<sub>2</sub> emissions from the gasoline on-road motor vehicle fleet in the MCMA in four different fuel scenarios (MTBE5, E6, E10 and ETBE13.7).

**Table 5**

Accumulated air pollutant emissions subdivided in criteria and toxic pollutants and CO<sub>2</sub> from 2002 to 2030 of the gasoline on-road motor vehicle fleet in the MAMC in four different fuel scenarios (MTBE5, E6, E10 and ETBE13.7).

	Accumulated emissions (thousand tonnes)				Avoided emissions from MTBE5 (%)		
	MTBE5	E6	E10	ETBE13.7	E6	E10	ETBE13.7
CO	82,275	79,479	75,009	79,748	3.4%	8.8%	3.1%
THC	8,453	8,352	8,333	8,119	1.2%	1.4%	4.0%
NOx	3,461	3,453	3,449	3,456	0.21%	0.33%	0.23%
SO <sub>2</sub>	82.5	79.2	80.4	80.2	4.1%	2.5%	2.8%
PM10	66.98	67.07	67.42	67.08	-0.14%	-0.67%	-0.15%
Benzene	229.1	208.3	207.7	201.6	9.1%	9.3%	12.0%
Formaldehyde	76	67	65	72	11.3%	14.1%	5.7%
Acetaldehyde	25	39	55	46	-57.9%	-119.5%	-84.9%
1,3-Butadiene	30	28	27	25	6.2%	9.5%	19.0%
Sub-total (criteria and toxic)	94,698	91,774	87,294	91,814	3.1%	7.8%	3.0%
CO <sub>2</sub>	1,731,474	1,658,978	1,599,921	1,648,882	4.2%	7.6%	4.8%
Total	1,826,172	1,750,752	1,687,215	1,740,696	4.1%	7.6%	4.7%

The accumulated avoided CO<sub>2</sub> emissions due to ethanol burned as a gasoline oxygenate by on-road motor vehicles in MCMA account for 132 Mtonnes in the E10 scenario (7.6% less than reference scenario), 83 Mtonnes in the ETBE13.7 scenario (4.7% less) and finally 72 Mtonnes in the E6 scenario (4.1% less).

#### 4. Discussion

From Figs. 4–6 can be shown that at the beginning of the analyzed period all pollutants show an increasing tendency similar to the tendency of the number of on-road gasoline vehicles, reaching a maximum and thereafter all pollutants emissions except PM10, CO and CO<sub>2</sub> decrease. This is in general but we can distinguish three specific behavior groups: one where the emissions after the introduction of Tier 2 are controlled completely: NOx, THC and the toxic air emissions. In this group all emissions are unequivocally reduced due to Tier 2 introduction, reaching in 2030 levels that are below 2002 as a proof of its effectiveness.

The second group is one where CO and PM10 emissions reaches a maximum, then decrease to a minimum by 2019 for CO and 2014 for PM10, and then rise again as the number of vehicles does. It is noted that in all scenarios CO emissions in 2030 are very similar among scenarios and all are 26% smaller than 2002 values. This behavior shows that Tier 2 regulations will have a very effective reducing and delaying effect. In PM10 case the reduction is not significant and there is no delaying effect exerted by Tier 2 regulations, the PM10 emissions will grow as the number of vehicles will in all scenarios.

A third kind of behavior was observed from SO<sub>2</sub> emissions, where Tier 2 mandates a drastic reduction from an average concentration of 120 ppm to 30 ppm by 2010. After this year it is observed a very slow emissions increase, which results directly proportional to the number of vehicles.

All analyzed air pollutants except PM10 and CO<sub>2</sub> show substantial decreasing emissions by 2030 that are well below 2002 levels, this behavior confirm that Tier 1 and Tier 2 effectively will control the analyzed air pollutants. Table 5 shows that the differences among scenarios of accumulated avoided emissions of PM10 and NOx are not significant (less than 1%). When considering the total accumulated avoided emissions of all pollutants by weight, the best alternative scenario is E10, because is the one with largest emissions reductions of CO<sub>2</sub>, formaldehydes and CO. Reminding that CO<sub>2</sub> emissions are the largest emissions percentage by weight, 94.8%.

The second best scenarios are ETBE13.7 and E6. ETBE13.7

changes to produce and retail which means that ETBE 13.7 is maybe the more cost effective scenario [41]. It is also the scenario that avoids less CO and formaldehyde emissions. Scenario E6 is the best in avoiding SO<sub>2</sub> and acetaldehydes emissions although is the scenario that avoids less THC, benzene and 1,3-butadiene. Following the same criteria the worst scenario is the reference scenario, except in acetaldehyde emissions where the smaller amount of this pollutant is produced.

#### 5. Conclusions

Tier 1 and Tier 2 are very efficient regulations to control completely NOx, THC, and the toxic pollutants considered. It drastically reduces SO<sub>2</sub> emissions and effectively lowers CO emissions. Then, due to the form of the curves, it can be said that Tier 1 and Tier 2 have many environmental benefits, except in two analyzed pollutants, PM10 and CO<sub>2</sub>. The environmental benefits of Tier 1 and Tier 2 regulations are significantly higher than the benefits corresponding to the analyzed ethanol blendings.

The direct ethanol benefits from the proposed gasoline substitution for ethanol, in local and regional levels are not significant due to their small percentages, and the differences among the alternative and reference scenarios tend to diminish by the end of the analyzed period. Regarding the ethanol content in gasoline can be said that at an increased concentration, E10 or more, the environmental benefits are greater when considering its final use only, being the mitigation of CO<sub>2</sub> the immediate greatest benefit, a lifecycle analysis should be done to account for the emissions released in the various existing processes and different biomass sources involved in ethanol production.

#### Acknowledgements

The authors wish to thank to Eng. Eduardo Olivares from SEMARNAT who provided an access to MOBILE6-Mexico model. This study was supported by project Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética-2009 No. 117808.

#### References

- [1] Brunekreef B, Holgate S. Air pollution and health. *The Lancet* 2002;360 (9341):1233–42.
- [2] Heinrich J, Schwarze PE, Stilianakis N, Momas I, Medina S, Totlandsdal AI, et al. Studies on health effects of transport-related air pollution. In: Krzyzanowski M, et al., editors. Health effects of transport-related air pollution. World Health Organization; 2005. p. 125–85.
- [3] Fuelestvedt IS, Berntsen T, Mvhrre G, Rvndal K, Skeie RB. Climate forcing from

- [4] Smith SJ, Pitcher H, Wigley TML. Global and regional anthropogenic sulfur dioxide emissions. *Global and Planetary Change* 2001;29(1–2):99–119.
- [5] Cofala J, Amann M, Klimont Z, Kupiainen K, Höglund-Isaksson L. Scenarios of global anthropogenic emissions of air pollutants and methane until 2030. *Atmospheric Environment* 2007;41(38):8486–99.
- [6] Molina M. Air quality in the Mexico Megacity. And integrated assessment. Kluwer Academic Publishers; 2002.
- [7] Téllez-Rojo MM, Romieu I, Ruíz Velasco S, Lezana MA, Hernández-Avila MM. Daily respiratory mortality and PM10 pollution in Mexico City: importance of considering place of death. *European Respiratory Journal* 2000;16(3):391–6.
- [8] SMA (Secretaría del Medio Ambiente). Inventario de emisiones a la atmósfera Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2002, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, México; 2003.
- [9] SMA. Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006, del Gobierno de Distrito Federal; 2008.
- [10] SMA. Inventario de contaminantes tóxicos de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Distrito Federal; 2008.
- [11] SMA. Inventario Gases de Efecto Invernadero en la Zona Metropolitana del Valle de México 2006, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Distrito Federal; 2008.
- [12] Rivero-Serrano O, Guadalupe Ponciano Rodríguez y Teresa Fourtoul van der Goes. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria. Editorial Fondo de Cultura Económica, México; 1993.
- [13] Goldemberg J. Ethanol for a sustainable energy future. *Science* 2007;315(5813):808–10. doi: 10.1126/science.1137013. Available at: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/315/5813/808.pdf>.
- [14] Thomas CE. Transportation options in a carbon-constrained world: hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009;34(23):9279–96.
- [15] IEA (International Energy Agency). Transport, energy and CO<sub>2</sub>: moving towards sustainability. Paris: OCDE; 2009. Available at: [http://www.iea.org/publications/free\\_new\\_Desc.asp?PUBS\\_ID=2133](http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2133).
- [16] Manzini F. Inserting renewable fuels and technologies for transport in Mexico City Metropolitan Area. *International Journal of Hydrogen Energy* 2006;31:327–35.
- [17] Leder F, Shapiro JN. This time it's different: an inevitable decline in world petroleum production will keep oil product prices high, causing military conflicts and shifting wealth and power from democracies to authoritarian regimes. *Energy Policy* 2008;36(8):2850–2.
- [18] ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Biomass energy data book, 2nd ed., U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, ORNL Office of the Biomass Program; 2009.
- [19] Nguyen TLT, Gheewala SH, Garivait S. Fossil energy savings and GHG mitigation potentials of ethanol as a gasoline substitute in Thailand. *Energy Policy* 2007;35(10):5195–205.
- [20] Schifter I, Vera M, Diaz L, Guzmán E, Ramos F, López-Salinas E. Environmental implications on the oxygenation of gasoline with ethanol in the metropolitan area of Mexico City. *Environmental Science & Technology* 2001;35(10):1893–901.
- [21] Lynd L. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: technology, economics, the environment, and policy. *Annual Review of Energy and Environment* 1996;21:403–65.
- [22] Winebrake J, Wang M, He D. Toxic emissions from mobile sources: a total fuel-cycle analysis for conventional and alternative fuel vehicles. Argonne National Lab. USA; 2000.
- [23] HCEPW (Health Canada Expert Panel Workshop). Potential health effects of ethanol-blend gasoline. Summary report; 2003.
- [24] Bayraktar H. Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines. *Renewable Energy* 2005;30(11):1733–47.
- [25] Niven RK. Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2005;9(6):535–55.
- [26] EPA (United States Environmental Protection Agency). Impacts on emissions from vehicles, nonroad equipment, and, fuel production facilities. In: Regulatory Impact Analysis: Renewable Fuel Standard Program. US EPA; 2007, pp. 119–73. Available at: <http://www.epa.gov/oms/renewablefuels/420r07004.pdf>.
- [27] Graham LA, Belisle SL, Baas C-L. Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. *Atmospheric Environment* 2008;42:4498–516.
- [28] Koç M, Sekmen Y, Topgül T, Yücesu HS. The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. *Renewable Energy* 2009;34:2101–6.
- [29] SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010, SEMARNAT, Gobierno del Estado de México, Gobierno del Distrito Federal y Secretaría de Salud, México; 2002. 381 p.
- [30] Rodolfo Sosa E, Humberto Bravo A, Violeta Mugica A, Pablo Sanchez A, Emma Bueno L, Krupa S. Levels and source apportionment of volatile organic compounds in southwestern area of Mexico City. *Environmental Pollution* 2009;157:1038–44.
- [31] Schifter I, Díaz L, Vera M, Guzmán E, López-Salinas E. Impact of sulfur-in-gasoline on motor vehicle emissions in the Metropolitan Area of Mexico City. *Fuel* 2003;82(13):1605–12.
- [32] EPA (United States Environmental Protection Agency). Control of air pollution from new motor vehicles: Tier 2 motor vehicle emissions standards and gasoline sulfur control requirements; final rule. 40 CFR Parts 80, 85, and 86. Federal Register, 65 (28), February 10, 2000, 6697–6746. Available at: [http://www.sba.gov/advo/laws/is\\_tier2fr1.pdf](http://www.sba.gov/advo/laws/is_tier2fr1.pdf).
- [33] Moon HK. Current and future US Tier 2 vehicles program and catalytic emission control technologies to meet the future Tier 2 standards. *Korean Journal of Chemical Engineering* 2007;24(2):209–22.
- [34] Enciso A. Petróleos Mexicanos incumple norma para mejorar ambiente, La Jornada, February 15, 2010. Available at: <http://www.jornada.unam.mx/2010/02/15/index.php?section=sociedad&article=043n1soc>.
- [35] SEMIP (Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal). Programa mexicano de etanol como aditivo de la gasolina. México: SEMIP; 1988.
- [36] SENER (Secretaría de Energía). Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Gobernación, February 1, 2008. Available at: [http://www.energia.gob.mx/webSener/res/Acerca\\_de/SENER0102\\_2008.pdf](http://www.energia.gob.mx/webSener/res/Acerca_de/SENER0102_2008.pdf).
- [37] SENER. Programa de introducción de bionergéticos. Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Gobernación, 2009. Available at: <http://www.sener-gob.mx/webSener/res/0/Prog%20Introd%20Bioen.pdf>.
- [38] Miklos T, Tello ME. Planeación prospectiva: una estrategia para el diseño del futuro. Limusa Editors, Mexico; 1998.
- [39] IMT (Instituto Mexicano del Transporte). Manual estadístico del sector transporte 2008. Mexico: Secretaría de Comunicaciones y Transportes; 2008.
- [40] SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales). Norma Oficial Mexicana: Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental, NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, Diario Oficial de la Federación de la Secretaría de Gobernación, January 30, 2006. Available at: <http://www.dof.gob.mx/documentos/892/semarna/semarna.htm>.
- [41] Rock KL, Korpelshoek M. Increasing refinery biofuels production. *PTQ Catalysis* 2008;45–51. Available at: [www.cbi.com/about/articles/documents/CDTech.pdf](http://www.cbi.com/about/articles/documents/CDTech.pdf).
- [42] ERG (Eastern Research Group). MOBILE6-Mexico, Prepared for Western Governors' Association, Austin, TX, USA; 2003.
- [43] Wolf ME, Fields PG, Manne GK, Villegas MTL, Bravo VG, Gómez RI. Developing Mexico national emissions inventory projections for the future years of 2008, 2012, and 2030. In: 18th annual international emission inventory conference; 2009. Available at: <http://www.epa.gov/ttn/chieff/conference/ei18/session2/wolf.pdf>.
- [44] DGPCC-GDF (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación). Informe mensual de la calidad del aire. Octubre 1996, Red Automática de Monitoreo Atmosférico, de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (RAMA) y Comisión Ambiental Metropolitana, 1996. Available at: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/bimestrales/boletin1996/bol1096.pdf>.





## Environmental and economic feasibility of sugarcane ethanol for the Mexican transport sector

Carlos A. García<sup>a,\*</sup>, Fabio Manzini<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Posgrado en Ingeniería (Energía), Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Colonia Centro, Temixco, Morelos 62580, Mexico*

<sup>b</sup> *Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Colonia Centro, Temixco, Morelos 62580, Mexico*

Communicated by: Associate Editor Estrada-Gasca

### Abstract

This study analyzes the environmental and economic feasibility of ethanol produced from sugarcane for use as a potential gasoline substitute in the Mexican transport sector from 2010 to 2030. One scenario was created by projecting the historical trend of energy demand assuming that a fraction of this demand is satisfied with ethanol produced from the cultivation of 2.9 million hectares of sugarcane. A life cycle study was performed according to the recommendations from the European Union Directive on Renewable Energies (that include direct land use change emissions) and was used to estimate life cycle Greenhouse gas (GHG) emissions. The method used by Fingermaier et al. (2010) was adopted to estimate the water consumption. In the economic analysis, the production cost of ethanol was calculated, and a mitigation cost for carbon dioxide equivalent emissions was estimated. The potential for employment generation was also estimated. The results demonstrate that water use increases by 29.4 times and that the costs increase by 10,706 million USD with the alternative scenario. This scenario, however, has the potential to create 560,619 direct jobs. Furthermore, GHG mitigation is confirmed since the reference scenario resulted in GHG gasoline life cycle emissions of 78.7 kgCO<sub>2e</sub>/GJ while the alternative scenario resulted in Ethanol GHG emissions in the life cycle of 57.52 kgCO<sub>2e</sub>/GJ.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Climate Change mitigation; Biofuels; Transport sector alternative fuels; Renewable energy; Energy prospective scenarios for Mexico

### 1. Introduction

The transport sector in 2009 accounted for approximately 19% of global final energy consumption and almost a quarter of the worldwide CO<sub>2</sub> emissions, mainly from cars and trucks (IEA, 2009). Additionally, according to the same source, transport energy use and CO<sub>2</sub> emissions are projected to increase to nearly 50% of the total final energy consumption by 2030. In Mexico, the transport sector consumes approximately 47.6% of the total end use energy (SENER, 2009a). In 2005, the transportation sector

was responsible for 38% of the total CO<sub>2</sub> emissions (SEMARNAT, 2007). These situations indicate the importance of finding new ways to reduce greenhouse gas emissions and to save primary energy resources in the transport sector.

One of the proposed ways to solve these problems is to use new non-fossil fuels. At present, ethanol is the most used renewable fuel in the transport sector. Ethanol can be considered a renewable energy source because it can be obtained from crops and other biomass sources. Additionally, it is considered carbon neutral because the CO<sub>2</sub> emitted by its combustion was previously sequestered from the atmosphere during the growth of the plants used as feedstock. Global production of ethanol reached 65,614

\* Corresponding author. Tel.: +52 55 5622 9704; fax: +52 55 5622 9791.  
E-mail address: [cagab@cie.unam.mx](mailto:cagab@cie.unam.mx) (C.A. García).

million liters in 2008 (RFA, 2009), and 37% of this global ethanol production was obtained from sugarcane.

Mexico is the sixth largest producer of sugarcane in the world. The sugar industry is the oldest industry in Mexico with the first sugar mill having been constructed in 1526 by Cortés. Currently, the sugar industry generates 450 thousand direct jobs and 2.2 million indirect jobs, resulting in 2.5% of the Gross Internal Product of the industrial sector (SAGARPA, 2007). In the 2008/2009 milling season, 663,057 ha were harvested, and 42.5 million tons of sugarcane were processed by the sugar mills. This resulted in 0.054 million tons of molasses (3.6% of the total) used for non-fuel ethanol production, with an output of 14.5 million liters (UNC).

The debate in Mexico on the viability of ethanol use in the transportation sector to achieve the goals of GHG mitigation, energy diversification, and increased employment in industrial and rural sectors has been revived over the past few years. In 2008, the “Law for the Promotion and Development of Biofuels” (LPDB, 2008) mandated that the use of biodiesel and ethanol in motor vehicles must be implemented through a Biofuels Introduction Program published in 2009 (SENER, 2009b). This program states that ethanol will be used as a gasoline oxygenate in a 6% volume proportion, known as E6, and will have to be distributed in three major cities, Guadalajara (by the end of 2011), Monterrey and Mexico City and its metropolitan area, by the end of 2012. It is worth noting that this program does not include sugarcane production that is currently being used for sugar production.

In this article, the feasibility of inserting sugarcane ethanol into the Mexican transport sector was analyzed. With this intention, we constructed a reference and an alternative scenario to be compared in terms of their environmental and economic feasibility. The environmental feasibility includes the accounting of Greenhouse gas (GHG) emissions in their life cycle and water consumption. Life cycle GHG emissions were calculated according to the recommendations from the European Union Directive on Renewable Energies, and water consumption was calculated as the green and blue water demand as proposed by Fingerman et al. (2010). The economic feasibility was evaluated in terms of a cost analysis that included a CO<sub>2</sub> mitigation cost.

## 2. Methods

### 2.1. Reference scenario construction

The reference scenario corresponds to the Business As Usual scenario (BAU) based on gasoline consumption for the base year of 2009. The period of analysis is 20 years. Gasoline demand was projected using a time-series and resulted in a 5.0% AAGR (SENER, Various years) based on consumption over the last 10 years. This assumption was smaller than the AAGR of 5.4% considered in the National Hydrocarbons Prospective until the year 2017

(SENER, 2008). GHG emissions and water consumption were calculated for this gasoline demand. Scenario constructions were developed and calculated using spreadsheets built for this study.

#### 2.1.1. GHG gasoline emissions

To analyze GHG mitigation compared with a reference scenario, we assumed a value of 78.7 kgCO<sub>2e</sub>/GJ for the gasoline life cycle in the reference scenario. This value was obtained in a study performed by the Instituto Mexicano del Petróleo (Mexican Petroleum Institute) and was preferred to the European value of 83.8 kgCO<sub>2e</sub>/GJ (EUC, 2009), and to the American value of 90–110 kgCO<sub>2e</sub>/GJ (Wang et al., 2011), because it reflects the internal amount of life cycle energy and resources that requires Mexican gasoline and we wanted to compare with a local conditions value. [Jorge Gasca, Personal communication].

#### 2.1.2. Gasoline water consumption

To account for water consumption in the lifecycle of fuels production we followed the methodology proposed by Fingerman et al. (2010). This methodology was used because it characterizes the life cycle effect of biofuels on water resources including agricultural water consumption, accounts for water that is applied through irrigation and rainwater. We also selected this method because it accounts for the water that is consumed during feedstock processing while other methods account only water for irrigation, then, following Fingerman's methodology we have an upper limit estimate of water consumption. Water consumption can be separated into green water and blue water. Green water refers to rainwater that is evaporated during crop growth, both evaporated and transpired (evapotranspired) by the crop, and blue water refers to surface and groundwater used for irrigation and industrial processing or refining (Hoekstra and Chapagain, 2008).

Since gasoline production does not involve green water consumption, we only accounted for blue water demanded during oil exploration, recovery, transportation and gasoline refining in the reference scenario. In the absence of data for Mexico, we adapted a mean water consumption value of 4.6 L<sub>water</sub>/L<sub>gasoline</sub> for gasoline production in the US, which was originally reported to range from 2.6 to 6.6 gal<sub>water</sub>/gal<sub>gasoline</sub> (Wu et al., 2009).

#### 2.1.3. Cost analysis

To estimate the cost of the reference scenario (expressed in 2005 USD), we assumed that gasoline prices evolved in Mexico during the analyzed period as proposed by Johnson et al. (2009). A discounting rate of 10% was assumed. Cost analyses were developed and calculated with spreadsheets built for this study.

### 2.2. Alternative scenario construction

The alternative scenario considered the same energy demand as the reference scenario with the main difference

being that some of the energy demand for the transport sector would be met by ethanol. The participation of ethanol energy is based on the potential area for sugarcane. This potential area, which currently contains original or converted grasslands for sugar cane cropping in Mexico, is estimated to be 2.9 million hectares, and it takes into consideration the restrictions to avoid competition with food production (Johnson et al., 2009).

The proposed alternative scenario involves the construction of 99 ethanol plants, autonomous distilleries with no sugar production and using current technology, over 20 years, which was our period of analysis. Each ethanol plant required sugarcane production equivalent to 29,200 ha. To schedule the construction and operation of the factories, we assumed an emerging phase characterized by high annual penetration rates of 55%, followed by a maturity phase with an average annual growth of 13%. GHG emissions and water use were calculated for gasoline and ethanol demand in the alternative scenario.

### 2.2.1. GHG emissions in the ethanol life cycle

The Life Cycle Analysis (LCA) for ethanol production was performed according to the methodology recommended by the Renewable Energy Directive (RED) issued by the Parliament of the European Union (EUC, 2009). System boundaries included direct land use change, crop production, biomass hauling transport to the plant burning the fossil fuel, industrial conversion, and transport to admixture facilities (Fig. 1). In terms of crop production, we considered the emissions from soil, according to the IPCC recommendations (IPCC, 2006), fertilizer and pesticide production, emissions from agricultural machinery, and sugar cane burning for harvest. Industrial production included emissions from fuels for heat and electricity pro-

duction. Emissions from transportation occur from fossil fuel use by trucks transporting sugarcane to mills and ethanol to admixture facilities.

The gases considered were CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O. Mexican data was obtained by García et al. (2011) and is based on field observation in the Mexican sugar mill of Motzorongo with an average supply area of 17,000 ha (Table 1).

For the calculation of change in direct land use emissions, we used the average carbon content for biomass and soil reported in García et al. (2011) following INEGI, 2006 (Table 2). Carbon emissions were amortized over a 20-year period according to the RED recommendation (EUC, 2009).

Ethanol LCA was developed using the Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) Carbon Calculator, developed for the Renewable Fuels Agency in the UK (RTFO).

### 2.2.2. Ethanol water consumption

We estimated green water as the water evapotranspirated by the sugarcane. The evapotranspiration was calcu-

Table 1  
Life Cycle Analysis data for the cultivation, industrial and transport phases includes raw material input, fuels and electricity used.

	Mexico Ethanol
<i>Cultivation</i>	
Nitrogen (kg/ha × yr)	126
Phosphate P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha × yr)	42
Potassium oxide K <sub>2</sub> O (kg/ha × yr)	150
CaO <sub>3</sub> (kg/ha × yr)	3000
Pesticides (kg/ha × yr)	2
Diesel (kg/ha × yr)	109
Irrigation (MJ/ha × yr)	–
Yield (t cane/ha × yr)	70
<i>Industrial phase</i>	
Surplus electricity (kWh/t cane)	8.8
Plant Yield (L ethanol/t cane)	83.2
<i>Transport</i>	
Biomass transport (km, round trip)	87.2
Admixture and distribution transport (km)	300

Source: García et al., 2011.

Table 2

Carbon (C) values for carbon in biomass above and below ground, and the calculations for elemental carbon contained within soil organic matter or soil carbon for Direct Land Use Change.

	t C/ha
Previous use, grassland	
Biomass total	95.4
Biomass above + below ground	34.2
Soil	61.2
Land use change to Sugarcane	
Biomass total	69.4
Biomass above + below ground	12.6
Soil	56.8

Source: (García et al., 2011) based on (INEGI, 2006).

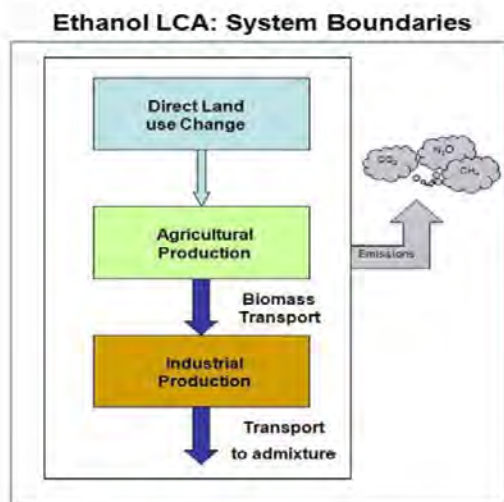


Fig. 1. System boundaries for ethanol LCA.

Table 3  
Meteorological data from various sources and Reference Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) calculated with CROPWAT.

Month	Min temp. (°C)	Max temp. (°C)	Humidity (%)	Wind (km/day)	Sunshine (h)	ET <sub>o</sub> (mm/day)
January	16.3	26.6	75	226	11	3.87
February	16.2	27.4	71	220	11.5	4.49
March	18.6	31.5	65	215	11.9	5.74
April	20.5	33.2	65	190	12.4	6.33
May	22.1	34.6	69	159	12.7	6.5
June	22	32.8	76	160	12.9	6.18
July	21.4	31.7	79	179	12.9	5.95
August	21.5	31.8	79	163	12.5	5.8
September	21.6	31.6	79	155	12.1	5.48
October	20.4	30.2	78	184	11.6	4.84
November	18.7	28.5	77	212	11.1	4.16
December	17	27.1	77	228	11	3.76

Sources: (FAO; Allen et al., 1998; NCM; ASDC).

Table 4  
Structure of operating costs assumed in this study.

	Unit cost USD/L <sub>et(hanol)</sub>
Investment cost	0.017
O&M	0.066
Sugar cane	0.158
Electricity sales	0.002
Total cost	0.239

The following costs are considered: Capital cost 55 million USD (Van den Wall Bake et al., 2009); O&M 161 USD per m<sup>3</sup> of ethanol (Moreira, 2007); sugar cane costs 28.86 USD per ton (own calculations based on field data); cane transport 3.0 USD per tonne of sugar cane (Johnson et al., 2009); Electricity sales 0.0825 USD/kWh (Johnson et al., 2009).

lated using CROPWAT software developed by (FAO). This model calculates the crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) using the Penman–Monteith equation, which is based on a reference crop evapotranspiration ET<sub>o</sub> and a crop coefficient K<sub>c</sub> (this value accounts for the effect of characteristics such as crop height, surface coverage and albedo that distinguish a crop from the reference surface (Fingerman et al., 2010) with the expression  $ET_c = ET_o * K_c$  (Allen et al., 1998). ET<sub>o</sub> was calculated with CROPWAT using temperatures and rainwater data from 16 meteorological stations around the potential area (NCM); wind speed and humidity data were taken from (ASDC); sunshine and sugar cane coefficients were taken from Allen et al. (1998) (Table 3). We calculated ET<sub>c</sub> assuming that the crop achieved full production for the given climate (we did not apply stress coefficient K<sub>s</sub> (Allen et al., 1998).

The blue water demand considered consumption from only an autonomous distillery (no irrigation water use) which was 1.83 m<sup>3</sup>/t<sub>sugarcane</sub> according to (Moreira, 2007).

### 2.2.3. Economic analysis

This study considered that ethanol is produced in distillery plants with capacities of 170 million l/year, and an

Table 5  
Hours of labor during sugarcane production.

Activity	Modality	Units	Quantity
Land clearing	Mechanical	h/ha	1
Plowing	Mechanical	h/ha	1
Furrowing	Mechanical	h/ha	0.8
Harrowing	Mechanical	h/ha	0.6
Fertilizers and herbicides transport	Mechanical	h/ha	2
Planting	Manual	h/ha	72
Fertilization	Manual	h/ha	5
Pest control	Manual	h/ha	5
Herbicides application	Manual	h/ha	5
Weeds control	Manual	h/ha	80
Harvest	Mechanical and manual	h/ha	140
Total		h/ha	312.4

Source: field data.

investment cost of 55 million USD. This volume implies a cultivation of 29,200 ha for each plant, assuming that obtaining the land in Mexico would not provide a barrier to the development of the sugarcane crops. We used the Present Value method with a discounting rate of 10% and all costs expressed in 2005 USD. See Table 4 for unit costs assumptions.

### 2.2.4. Employment creation

We calculated direct employment generation as jobs from the agricultural production and ethanol plant management, operation and maintenance. For agricultural employment, we collected data from the Motzorongo sugar mill supply area (Table 5). We assumed an average of 1800 yearly hours per full-time-job (Neuwahl et al., 2008) to express the agricultural employment in full-time-job units.

To calculate industrial employment, we used the relation  $t_{\text{sugarcane processed}}/\text{jobs}$  based on employment data from Cornland et al. (2001) for distilleries with a capacity of 300 t<sub>sugarcane</sub>/h, and a total of 350 full-time-jobs from operation, maintenance and management.

Table 6  
Alternative scenario CO<sub>2e</sub> mitigation.

	Mitigation (tCO <sub>2e</sub> )
2010	77,700
2015	621,596
2020	3030,281
2025	5128,168
2030	7692,252
Accumulated	65,966,892

Source: own calculations.

### 3. Results

In this section, the results from the comparison between the alternative and the reference scenarios are presented.

#### 3.1. Energy Demand

By the year 2030, the estimated ethanol supply reached 7.7% of the total energy demand and accounts for 4699 PJ in the alternative scenario (Fig. 2). During the entire period analyzed, ethanol is expected to replace 4.9% of the total accumulated energy demand in the alternative scenario. The model used in this paper (RTFO) does not calculate the energy balance for this case. However, the energy balance for this case (ethanol from sugarcane juice with electricity surplus) is published in García et al. (2011) that is 4.8 GJ<sub>ethanol</sub>/GJ<sub>fossil</sub>.

#### 3.2. Reduction in GHG Emissions

The total GHG emissions are expressed in kgCO<sub>2e</sub>/GJ<sub>ethanol</sub>. Ethanol's GHG emissions in the life cycle account for 57.5 kgCO<sub>2e</sub>/GJ<sub>ethanol</sub>, where 53.6% of these emissions are due to direct land use change for the establishment of crops and 36.8% are related to sugar cane agricultural production. Excluding land use change emissions, the Mexican value reaches 26.7 kgCO<sub>2e</sub>/GJ<sub>ethanol</sub> (see Fig. 3).

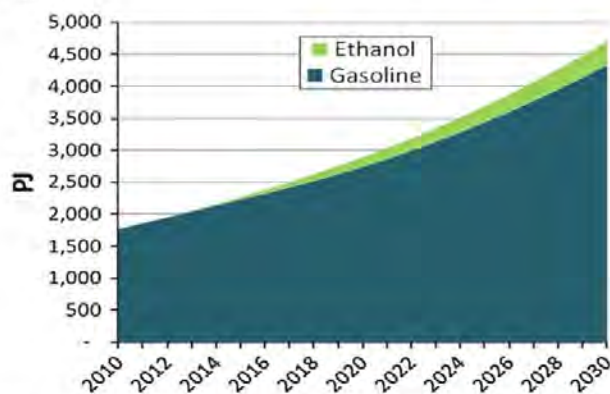


Fig. 2. Energy demand for the alternative scenario in the Mexican transportation sector.

The accumulated gasoline and ethanol GHG emissions in the life cycle reference scenario equal 4978 million tons of CO<sub>2e</sub> (MtCO<sub>2e</sub>). On the other hand, the accumulated GHG emissions accounted for 4912 MtCO<sub>2e</sub> in the alternative scenario (Table 6). CO<sub>2</sub> emissions could be reduced by 1.3% by 2030. Excluding direct land use change emissions, CO<sub>2</sub> mitigation would reach 3.2% over the whole period.

#### 3.3. Water consumption

Table 7 shows that water consumption for ethanol production is larger than water consumption for gasoline. This result is due to the green water that accounts for the great majority of the water demand.

Accounting for only the blue water, the alternative scenario has 18% more consumption than the reference scenario. If we also consider the green water, the alternative scenario consumes 29.4 times more water than the reference scenario (Table 8). Green water has value since it could be allocated for other crops or to environmental services (Fingerman et al., 2010).

#### 3.4. Cost analysis and CO<sub>2</sub> mitigation cost

Our results showed that the alternative scenario would have an investment cost of 2478 million USD and that its overall costs would be almost 383 billion USD. The total costs from the analysis of ethanol (including an average distribution cost of 15 USD/m<sup>3</sup> (Lozada et al., 2010) and a 10% profit) for the alternative scenario were higher than the reference scenario, which had total costs of almost 372

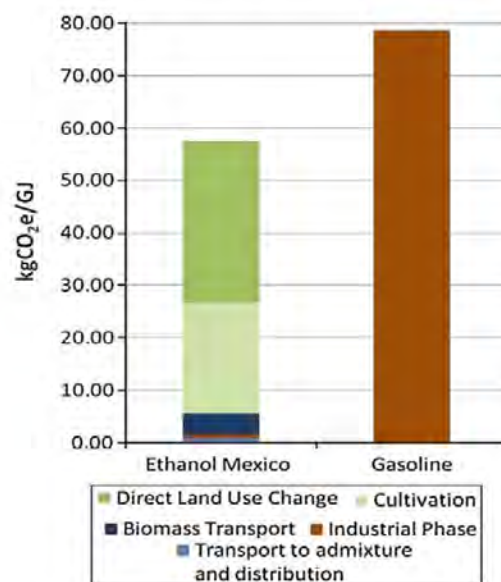


Fig. 3. Life cycle GHG emissions.

Table 7  
Ethanol and gasoline water consumption (in m<sup>3</sup>/GJ).

	Ethanol Mexico	Gasoline
Green Water	122	0
Blue Water	1.0	0.23

Source: (Wu et al., 2009; Moreira, 2007).

Table 8  
Water consumption (m<sup>3</sup>/GJ) for the reference and alternative scenarios.

	Reference scenario	Alternative scenario
Green water		380,338
Blue water	13,475	15,929
Total	13,475	396,267

Source: own calculations.

Table 9  
Cost-benefit analysis and mitigation cost of ethanol prices and gasoline prices in reference scenario vs. alternative scenario.

Overall costs (million USD)	10,706
Avoided CO <sub>2e</sub> emissions (million t)	65.9
Mitigation costs (USD per tCO <sub>2e</sub> )	162

Source: own calculations.

Table 10  
Employment creation for the alternative scenario.

	2010–2020	2021–2030	Total
Agricultural employment	197,646	304,070	501,716
Industrial employment	23,204	35,699	58,903
			560,619

Source: own calculations.

billion USD. These results indicate that ethanol use would require additional costs (see Table 9).

The calculated mitigation cost was 162 USD per tCO<sub>2e</sub> (Table 9), and was obtained by dividing overall costs and the total reduction in CO<sub>2e</sub> in the alternative scenario. This high value was due to the low mitigation obtained when considering land use change emissions. Mitigation cost without land use change emissions resulted in 66 USD per tCO<sub>2e</sub>.

### 3.5. Employment creation

The creation of employment from each ethanol plant accounts for 595 jobs in the factory and 5068 jobs in the sugarcane field supply area. The alternative scenario resulted in 560,619 direct jobs over the whole period for all ethanol plants (Table 10). This result does not represent net employment generation because it does not account for jobs lost from gasoline production.

## 4. Conclusions

The results indicate that the potential of ethanol as a gasoline substitute under considerations that limit its competition with food production, reaches 4.9% of the accumulated energy demand in the alternative scenario. These considerations also affect the potential mitigation in the alternative scenario due to large emissions from land use change from changing grassland to sugarcane-cultivated fields, where the potential mitigation achieves a very low accumulated emissions reduction of 1.3%.

In terms of implications on water resources, even if resources for blue water are comparable for gasoline and ethanol production, the demand for green water for the development of sugarcane crops results in 29.4 times more water consumption in the alternative scenario compared with the reference scenario.

The economic results show that costs for the alternative scenario when compared with the reference scenario require financing of around 2478 million USD to make ethanol a competitive fuel in the Mexican transport sector. It is important to note that the number of direct jobs created with ethanol production for fuel is greater than the actual number of jobs employed by the Mexican sugar industry.

## Acknowledgments

We thank Genice Grande for her advice on cost analysis and Maria de Jesús Pérez Orozco for data collection.

## References

- IEA (International Energy Agency). 2009. Transport, Energy and CO<sub>2</sub>, Moving towards sustainability.
- SENER (Secretaría de Energía). 2009a. Balance Nacional de Energía 2008. México.
- SEMARNAT (Secretaría De Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2007. Estrategia Nacional de Cambio Climático. México.
- RFA (Renewable Fuel Association). 2009. <<http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>>.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2007. Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar. México.
- UNC (Unión Nacional de Cañeros). <<http://www.cañeros.org.mx/>>.
- LPDB (Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos). 2008. Diario Oficial de la Federación. 1 de Febrero.
- SENER (Secretaría de Energía). 2009b. Programa de introducción de bionergéticos. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Gobernación. <<http://www.energia.gob.mx/res/0/Prog%20Intro%20Bioen.pdf>>.
- Fingerman, K.R., Torn, M.S., O'Hare, M.H., Kammen, D.M., 2010. Accounting for the water impacts of ethanol production. Environmental Research Letters 5, 014020 7pp.
- SENER (Secretaría de Energía). Balance Nacional de Energía. México. Various years.
- SENER (Secretaría de Energía). 2008. Prospectiva de Petrolíferos 2008.2017. México.
- EU (Commission of the European Communities). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

- <<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>>.
- Wang, M.Q., Han, J., Haq, Z., Tyner, W.E., Wu, M., Elgowainy, A., 2011. Energy and greenhouse gas emission effects of corn and cellulosic ethanol with technology improvements and land use changes. *Biomass and Bioenergy* 35, 1885–1896.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing.
- Wu, M., Mintz, M., Wang, M., Arora, S., 2009. *Consumptive Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline*. Argonne National Laboratory. Energy systems Division. USA.
- Johnson, T., Alatorre, C., Romo, Z., Liu, F., 2009. Low-Carbon Development for Mexico. In: Conference Edition. World Bank.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*, vol. 2. Energy.
- García, C.A., Fuentes, A., Hennecke, A., Riegelhaupt, R., Manzini, F., Maser, O., 2011. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy* 88, 2088–2097.
- INEGI (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero), 2006. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990–2002*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.
- RTFO (Renewable Transport Fuel Obligation). <<http://www.renewablefuelsagency.gov.uk/carboncalculator>>.
- FAO (Food and Agriculture Organization). CROPWAT model. <[http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html)>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, vol. 56.
- NCM (Normales Climatológicas de México). <<http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/norm/index.htm>>.
- ASDC (Atmospheric Science Data Center): NASA. <<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>>.
- Moreira, J.R., 2007. Water use and impacts due to ethanol production in Brazil. In: *International Conference on Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries*, Hyderabad, India.
- Van den Wall Bake, J.D., Junginger, M., Faaij, A., Poot, T., Walter, A., 2009. Explaining the experience curve: cost reduction of Brazilian ethanol from sugar cane. *Biomass and Bioenergy* 33, 644–658.
- Neuwahl, F., Löschel, A., Mongelli, I., Delgado, L., 2008. Employment impacts of EU biofuels policy: combining bottom-up technology information and sectoral market simulations in an input-output framework. *Ecological Economics* 68, 447–460.
- Cornland, D., Johnson, F., Yamba, F., Chidumayo, E., Morales, M., Kalumiana, O., Mtonga-Chidumayo, S., 2001. *Sugarcane resources for sustainable development; a case study in Luena, Zambia*. Stockholm Environmental Institute.
- Lozada, I., Islas, J., Grande, G., 2010. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 486–492.



## Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico

Carlos A. García<sup>a,\*</sup>, Alfredo Fuentes<sup>b,c</sup>, Anna Hennecke<sup>c,d</sup>, Enrique Riegelhaupt<sup>e</sup>, Fabio Manzini<sup>f</sup>, Omar Maserá<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Programa en Ingeniería (Energía), Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Prolongación Xicotépec S/N, Colonia Centro, Toluca, México 52580, México

<sup>b</sup> Centro de Investigaciones en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Anillo Condesa o Pólizos No. 870, Colonia Ex-Hacienda de San José de Huerta, 58100 Morelia, Michoacán, México

<sup>c</sup> IfU Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg GmbH, Wollmannstr. 2, 69120 Heidelberg, Germany

<sup>d</sup> Center for Development Research (ZDF), University of Bonn, Volkmar-Platz-Stra. 3, 53113 Bonn, Germany

<sup>e</sup> Red Mexicana de Bioenergía A.C. Av. San José del Oro, 400-20 Col. El Poblado CP 98241 Morelia, Mich., México

<sup>f</sup> Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Prolongación Xicotépec S/N, Colonia Centro, Toluca, México 52580, México

<sup>g</sup> Programa en Ingeniería (Energía), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad No. 3000, 04510, México D.F.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 13 August 2010

Received in revised form 23 December 2010

Accepted 25 December 2010

Available online 26 January 2011

#### Keywords:

Sugarcane ethanol

GHG emissions

Energy balance

Life cycle assessment

Biofuel

### ABSTRACT

The purpose of this work was to estimate GHG emissions and energy balances for the future expansion of sugarcane ethanol fuel production in Mexico with one current and four possible future modalities. We used the life cycle methodology that is recommended by the European Renewable Energy Directive (RED), which distinguished the following five system phases: direct Land Use Change (LUC); crop production; biomass transport to industry; industrial processing; and ethanol transport to admixture plants. Key variables affecting total GHG emissions and fossil energy used in ethanol production were LUC emissions, crop fertilization rates, the proportion of sugarcane areas that are burned to facilitate harvest, fossil fuels used in the industrial phase, and the method for allocation of emissions to co-products. The lower emissions and higher energy ratios that were observed in the present Brazilian case were mainly due to the lesser amount of fertilizers applied, also were due to the shorter distance of sugarcane transport, and to the smaller proportion of sugarcane areas that were burned to facilitate manual harvest. The resulting modality with the lowest emissions of equivalent carbon dioxide ( $\text{CO}_2\text{e}$ ) was ethanol produced from direct juice and generating surplus electricity with  $36.8 \text{ kgCO}_2\text{e/G}_{\text{ethanol}}$ . This was achieved using bagasse as the only fuel source to satisfy industrial phase needs for electricity and steam. Mexican emissions were higher than those calculated for Brazil ( $27.5 \text{ kgCO}_2\text{e/G}_{\text{ethanol}}$ ) among all modalities. The Mexican modality with the highest ratio of renewable/fossil energy was also ethanol from sugarcane juice generating surplus electricity with  $4.8 \text{ G}_{\text{renewable}}/\text{G}_{\text{fossil}}$ .

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

The climate change problem coupled with declining oil and gas reserves has led to the development of energy sources to minimize greenhouse gas (GHG) emissions and expand energy supplies from solar, wind, hydraulic, geothermal and bioenergy sources.

The bioenergy sources used most frequently in the transport sector are liquid biofuels that are either pure or mixed with conventional, oil-derived fuels. Biofuels are a renewable energy source because they are obtained from crops and other biomass sources. It is common practice in most LCA to count  $\text{CO}_2$  from biomass as neutral because  $\text{CO}_2$  from biofuel combustion was previously sequestered from the atmosphere during the growth of plants used as

feedstocks. Despite that not all authors agree with this statement in our work we assumed a Global Warming Potential of zero for  $\text{CO}_2$  from biofuels according to the RED [1].

Bioethanol produced by fermentation and distillation of sugary or starchy feedstocks is of particular importance. Global ethanol output grew from 17,000 million liters (ML) in 2000 to 65,614 ML in 2008 [2] and might provide up to 7% of the global energy used in the transport sector by 2030 [3]. Sugarcane is one of the most widely used feedstocks for ethanol, especially in Brazil [4] where it constituted 37% of global ethanol production in 2008 [2].

Mexico has a long tradition of sugarcane cropping that was introduced by the Spaniards in 1524. The Mexican sugar industry currently generates 450 thousand direct jobs and 2.2 million indirect jobs, comprising 2.5% of the Gross Internal Product of the industrial sector [5]. In the 2008/2009 milling season, 863,057 hectares of sugarcane were harvested and 42.9 million tonnes

\* Corresponding author. Tel.: +52 55 5622 9704; fax: +52 55 5622 9707.  
E-mail address: caga@icei.unam.mx (C.A. García).



(Mt) of sugarcane were processed by sugar mills resulting in 4.5 Mt of sugar. In addition, 1.5 Mt of molasses were produced, of which 0.05 Mt (3.6%) were used to produce ethanol with an output of 14.3 ML (6). While most of the remaining molasses was exported, mainly to the US, it could alternatively be used as an ethanol feedstock that might yield up to 400 ML of biofuel.

A recent study estimated that 2.9 million hectares are potentially suitable for sugarcane cultivation in Mexico and could yield up to 16,240 ML of ethanol per year, which would be similar to the present Brazilian output [7]. This study assessed the technical potential for new sugarcane plantations under the following conditions and assumptions that were deemed necessary to ensure sustainability and to avoid fuel versus food conflicts: (a) adequate rainfall ranges; (b) low terrain slopes; (c) long frost-free periods; (d) nature protection area and cultivated area exclusions; (e) present land uses (only natural and cultivated grasslands were included); and (f) high to medium potential yields.

Debate has re-emerged in Mexico as to the rationale for promoting ethanol use in the transport sector to achieve GHG mitigation, energy diversification, and increased employment in industrial and rural sectors. A biofuels Promotion and Development Law was passed in 2008 [8] to establish ethanol as an oxygenation additive in gasoline. As a result of statutory provisions, a program for biofuels introduction was drafted under the framework of the Intersectoral Bioenergy Strategy. The Program foresees the adoption of sustainability criteria for ethanol production, and the balance of GHG emissions and fossil energy are important aspects of the program [9].

The balance of GHG emissions and fossil energy in the sugarcane-sourced ethanol life-cycle is important because they evaluate GHG emissions and primary fossil fuel consumption along the entire ethanol production. Thus, these variables determine sugarcane ethanol effective GHG emissions mitigation potential and fossil fuel substitution level.

Despite the rapid growth of global ethanol production, its benefits in mitigating GHG emissions and substituting for fossil fuels continue to be questioned. Several life cycle studies focusing on GHG emissions and energy balances have been conducted, and these studies have arrived at different and sometimes contradictory conclusions [10–19]. One explanation for this disparity is that different methodologies and assumptions have been used, such as different system boundaries, fertilization levels, emission factors, co-product inclusions and exclusions, and diverse methods for allocating emissions to co-products.

To date, no evaluations of life-cycle GHG and energy balances for ethanol fuel produced in Mexico have been published. This data gap is mainly due to the lack of reliable and systematic statistical data on inputs used in agricultural and industrial phases. However, efforts have been undertaken to produce initial estimates based on data from other publications, default values, and limited field data (Mario Molina Center, pers.com.) [20–22]. The purpose of this work was to determine GHG emission and energy balances based on field data to allow for a better evaluation of environmental and energetic ramifications of ethanol fuel production in Mexico. In addition, this research has the following additional aims: to contribute to the debate on environmental impacts of ethanol fuel production; to assess the effects of different methodologies on Life cycle assessment (LCA) calculations; to highlight the influence of local conditions on these results; and to inform decision making processes in Mexico.

## 2. Sugarcane production and processing

### 2.1. Agricultural production

Visits were made to two sugar mills and one ethanol distillery where sugarcane is cultivated in five-year cycles followed by

replanting. Medium and high yields may vary between 70 and 93 t/ha year, depending on fertilization and irrigation. Soil tillage is fully mechanized, but harvest is mostly manual (95%). This last practice makes it necessary to burn sugarcane straw (cane tops and leaves) in the fields before and after harvesting to ease the cutter's work and to clear residues. The bagasse content in milled sugarcane is not affected by field burning, since bagasse is the fiber that always remains within the sugarcane stalks. Truck loading is mechanized.

### 2.2. Industrial processing

Ethanol can be produced directly from sugarcane juice or from molasses produced during the sugar making process (Fig. 1). Sugar production starts with sugarcane milling to extract juice, and this juice is clarified, filtered and concentrated. The concentrated juice is then crystallized, and sugar crystals are separated from molasses by centrifugation. This process may be repeated up to three times. Products of the first crystallization/centrifugation stage are termed "A" sugar and "A" molasses. Second stage products are termed "B" sugar and "B" molasses. Third stage products are termed "C" sugar and "C" or final molasses, and these "C" products do not contain recoverable sucrose but still have 50% fermentable sugars [23]. Final molasses are fermented by yeast cultures, and the wine that is obtained is distilled to obtain ethanol.

An alternative process that allows for higher molasses quantities to be fermented involves sparing fermentation using "B" molasses. In this case, only two crystallizations are undertaken to obtain "A" and "B" sugars, while "B" molasses are derived to produce ethanol. Instead of C sugar and C molasses, with lesser amounts of sugar obtained.

Hydrated ethanol of 96% purity must be dehydrated to 99.8% purity to allow for use as a gasoline additive.

### 2.3. Possible modalities of ethanol production in Mexico

Five modalities of ethanol production in Mexico were analyzed (Table 1).

- I. Ethanol from "C" molasses with bagasse and fuel oil (EMF). Medium average crop yields and corresponding inputs levels are assumed. The sugar mill produces "A", "B" and "C" sugars plus final molasses. The production involves burning all the bagasse and some fuel oil to produce steam and a part of the needed electricity, while the remaining energy needs are imported from the National Power Grid (NPG). This modality is actually applied by 38 of 54 sugar mills in Mexico [24] that have not attained energy self-sufficiency and use from 1 to 22 liters of fuel oil per ton of sugarcane processed. Our analysis assumed that a distillery was annexed to a sugar mill and operated using fuel oil as its only energy source.
- II. Ethanol from "B" molasses with fuel oil (EMBF). Medium average crop yields are assumed. The mill produces "A" and "B" sugars plus "B" molasses. Boilers use bagasse and fuel oil as supplementary fuels, and a part of the electricity is imported from the NPG. As in modality I, we assumed that a distillery was annexed to the mill that used fuel oil as its only energy source.
- III. Ethanol from "C" molasses without fuel oil and with bagasse as the only fuel (EMB). Medium average sugarcane yields are assumed. The mill produces "A", "B", and "C" sugars, plus final molasses for ethanol production. Boilers use only bagasse for steam and power production, which is consistent with practices in about 17 mills in Mexico. However, part of the electricity is purchased from the NPG. The distillery's

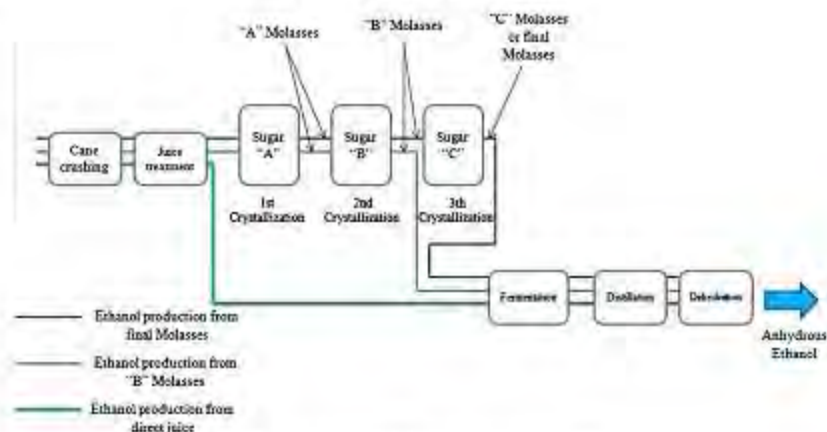


Fig. 1. Industrial processes of ethanol production using sugarcane.

Table 1  
Possible modalities for ethanol production in Mexico.

Modality	Crop yield (t/ha)	Ethanol source	Sugar output (kg/cane)	Energy source for sugar mill	Energy source for distillery	Electricity surplus (kW)	Ethanol output (L/cane)
ZMP	70	Final molasses	112 <sup>a</sup>	Bagasse + fuel oil	Fuel oil	IMP	8.8 <sup>a</sup>
ZMP	70	B molasses	92 <sup>a</sup>	Bagasse + fuel oil	Fuel oil	IMP	17.1 <sup>a</sup>
ZMB	70	Final molasses	120 <sup>a</sup>	Bagasse	Bagasse	IMP	7.8 <sup>a</sup>
ED	70	Direct juice	–	–	Bagasse	–	63.2 <sup>a</sup>
ED/E	70	Direct juice	–	–	Bagasse	EXP	63.2 <sup>a</sup>

ZMP – ethanol from 'C' molasses using bagasse and fuel oil.  
 ZMB – ethanol from 'B' molasses using bagasse and fuel oil.  
 ZMB – ethanol from 'C' molasses using bagasse.  
 ED – ethanol from direct juice using bagasse and without surplus electricity.  
 ED/E – ethanol from direct juice using bagasse and generating surplus electricity.  
<sup>a</sup> Source: [23].  
<sup>b</sup> Source: Based on [16].  
<sup>c</sup> Field data, La Gloria sugar mill and distillery.

boiler is also bagasse-operated. This modality corresponds to one actual case in Mexico.

- IV. Ethanol from direct juice without surplus electricity (ED). Medium average sugarcane yields and an autonomous distillery are assumed whereby only ethanol is produced. Bagasse is the only energy source with no electricity surplus. This is a case for which inputs and outputs at the industrial phase were estimated on the basis of Brazilian references.
- V. Ethanol from direct juice using bagasse as a fuel and generating surplus electricity (ED/E). This modality is basically the same as modality IV. The difference between this modality and modality IV is that surplus electricity is exported to the national grid because more efficient, high-pressure boilers are used.

In all modalities since both sugar extraction and ethanol production are fairly mature technologies, no significant increases are foreseen regarding industrial yields of sugar and ethanol.

### 3. Methodology of LCA

We used the methodology recommended by the Renewable Energy Directive (RED) of the European Union Parliament to perform LCAs for the five modalities of interest [1]. System boundaries were defined and followed by a detailed inventory of inputs and outputs that were registered in an especially designed data base. While most data were obtained by field observations, some of the industrial phase data were taken from other references.

GHG emissions and fossil energy balances were calculated with a modified computer model originally developed by the Institute for Energy and Environment Heidelberg (IFEU). This is a spread sheet model based in the RED methodology and previously used in other LCAs [28]. Emission and energy allocations were calculated according to the energy content of products and co-products for modalities that combine the production of sugar and ethanol. For modalities where only ethanol is produced ('autonomous distilleries'), emission credits were allocated if surplus electricity is

produced and exported to the grid. Emissions due to land use changes were calculated for each modality to explore effects of expanding sugarcane cultivation to well-suited lands. Emission and fossil energy balances were also calculated for a Brazilian case on the basis of data published by Macedo [16] and following the RED methodology. This measurement allowed us to compare results under the same system boundary definitions and with identical emission factors.

### 3.1. System boundaries definition

The following system boundaries defined processes that were included from the analysis: Land Use Change (LUC); sugarcane cultivation and harvest; sugarcane transportation to ethanol plants; industrial processing; and end product transportation to admixture facilities.

Emissions from sugarcane cultivation and harvest include the following: volatilization of nitrogen fertilizers; emissions and fossil energy from fertilizers<sup>1</sup> and pesticide production; fossil fuels used by agricultural machinery; and direct emissions from sugarcane burning before and after harvest. Emission and fossil energy use from industrial process included those from boiler fossil fuels and grid-imported electricity. Emissions and energy use from transportation, including transporting sugarcane to mills and ethanol to admixture facilities, occurs from fossil fuel use by trucks. Emissions from land use changes result from the reduction of carbon content in above ground biomass (AGB), below ground biomass (BGB), and organic carbon in soil (OCS) in areas needed to expand sugarcane cropping. GHG emissions considered in the analysis were CO<sub>2</sub>, methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) with global warming potentials of 1, 23, and 296, respectively [26].

The following emissions and energy sources were not considered in this study as they are not included in the RED methodology: machinery, equipment and facility construction; human work and seed.

Spreadsheets were used for data registration and to run a model to calculate emission and energy balances. Data were gathered "in situ" by the authors. The calculation model developed by the Institute for Energy and Environment Heidelberg (IFEU) was modified and adapted to fit conditions in Mexico. A module was also added to calculate fossil energy balances.

### 3.2. Data

Original data were obtained from the Motozongo sugar mill and La Gloria distillery, which are located in Veracruz, Mexico. Sugarcane growers, rural workers, truck and loader operators, mill workers, technicians, engineers and plant managers were interviewed. Data on energy inputs in sugarcane cultivation, sugarcane loading and transportation were also collected (Table 2). Emissions associated with nitrogen fertilizer volatilization were calculated according to Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) recommendations [27]. Industrial phase inputs and outputs were also collected during the field visits, although some data points were taken from the literature. Values to capture transportation to admixture plants were estimated based on the average distance from mills to existing gasoline storage and mixing plants.

To assess GHG emissions from NPC electricity imports, average emission factors were calculated using data from the National Energy Balance 2007 [28]. A matrix was constructed that contained the share of each primary energy source. After applying emission factors from the IPCC [29], we calculated an average emission factor of

488 gCO<sub>2</sub>e/kWh. We also determined an average energy efficiency of 40.7% from the weighted mean of all fossil fuel power plants.

### 3.3. Assumptions about land use change (LUC)

Every biofuel production process starts at crop settlement and thereby implies a change in land use. LUCs result in altered carbon stocks in soil and vegetation. Emissions by direct LUC are due to variations in AGB carbon content (e.g., stems, branches, leaves, and litter), BGB carbon content (e.g., roots and rhizomes), and OCS. Our methodology assumed that carbon lost through LUC is emitted as CO<sub>2</sub>. A strong negative input in GHG balances occurs when high carbon lands are cultivated as is the case when forested lands are converted to sugarcane fields. This substantial LUC results in negative overall CO<sub>2</sub> balances for ethanol production [30–32].

The impact of sugarcane expansion to lands suitable for diverse crops was evaluated under each Mexican production modality. Expansion to degraded lands was not considered because analyzed production systems considered medium sugarcane yields that cannot be achieved on degraded lands without restoration and irrigation.

AGB values were estimated for diverse vegetation types. According to the National Inventory of GHG Emissions INEGI [33], the following vegetation types occur in Mexican climatic zones with good aptitude for sugarcane cultivation: grasslands; low and medium tropical forests; high tropical forests, brushlands; and cultivated areas. We used the average carbon content (tC/ha) in AGB and OCS reported by INEGI (Table 3). Data on BGB were also derived from INEGI. While there is uncertainty surrounding the OCS values, they were the best data available for Mexican soils. LUC emissions were annualized over a 20-year period [1].

Other GHG emissions from indirect LUC occurred when biofuel crop production was expanded to areas that had been previously cultivated, resulting in crop displacements to previously uncultivated lands. These indirect emissions cannot be attributed to specific production processes because they depend on market demand, relative prices, and substitute availability. Indirect LUC is a complex process that is not fully understood by the scientific community and so is not included in this study.

### 3.4. Allocation

One or more additional products besides ethanol or biodiesel are obtained in many biofuel production systems. It is necessary to decide the share of emissions and energy that corresponds to each additional co-product. Allocation of energy and/or emissions can be determined by economic value, co-product mass, energy content, or substitution.

Economic valuation considers the amount and market price of products and co-products and is based on the assumption that market prices are the driver of the production process. One disadvantage of this approach is that prices are not constant over time. In addition, allocations to biofuels would be strongly influenced by price variations in co-products markets [34,35]. Finally, subsidies toward fuels and co-products might distort relative prices [37,35].

Allocation by mass and energy contents account for physical properties. Mass content accounts for the relative masses of biofuels and co-products, and energy content accounts for the energy content value in biofuels and co-products. The energy content consideration is adopted by RED and its main advantage is that heating values are constant, easily determined and comparable to allocations by substitution. A possible disadvantage of this allocation is that a given co-product may have a high calorific content but a low market price.

In substitution allocations or "system expansion", the biofuel is considered the only product, but emissions or energy substituted

<sup>1</sup> Emission factors assumed for fertilizers were 2.41 kgCO<sub>2</sub>e/kg N, 1.18 kgCO<sub>2</sub>e/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0.68 kgCO<sub>2</sub>e/kg K<sub>2</sub>O, 0.28 kgCO<sub>2</sub>e/kg CaO.

**Table 2**  
Data used for LCA calculations (field-collected unless otherwise indicated).

	EMF	EMEP	EMB	ED	EDSE	Brazil EDSE <sup>a</sup>
<b>Cultivation</b>						
Nitrogen (kg/ha yr)	128	128	128	128	128	80 <sup>b</sup>
Phosphate (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (kg/ha yr)	42	42	42	42	42	45 <sup>b</sup>
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O) (kg/ha yr)	190	190	190	190	190	114.8 <sup>b</sup>
CaO (kg/ha yr)	3000	3000	3000	3000	3000	1800
Pesticides (kg/ha yr)	2	2	2	2	2	5
Diesel (kg/ha yr)	109	109	109	109	109	104
Irrigation (MJ/ha yr)	–	–	–	–	–	–
Yield (t cane/ha yr)	70	70	70	70	70	67.1
<b>Industrial phase</b>						
Fuel oil (kg/t cane)	10.7 <sup>a</sup>	7.4 <sup>a</sup>	–	–	–	–
Electricity buying (kWh/t cane)	7.5 <sup>a</sup>	20 <sup>a</sup>	7.5	–	–	–
Surplus electricity (kWh/t cane)	–	–	–	–	8.8 <sup>a</sup>	2.7
Factory yield (L ethanol/t cane)	8.8 <sup>a</sup>	17.1 <sup>a</sup>	7.9	83.2 <sup>a</sup>	83.2 <sup>a</sup>	83.3
<b>Transport</b>						
Biomass transport (km, round trip)	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	45
Administrative transport (km)	300	300	300	300	300	300 <sup>a</sup>

EMF – ethanol from 'C' molasses using bagasse and fuel oil.

EMEP – ethanol from 'B' molasses using bagasse and fuel oil.

EMB – ethanol from 'C' molasses using bagasse.

ED – ethanol from direct juice using bagasse and without surplus electricity.

EDSE – ethanol from direct juice using bagasse and generating surplus electricity.

Brazil EDSE – Brazilian ethanol from direct juice using bagasse as a fuel and generating surplus electricity.

<sup>a</sup> Taken from Macedo [18].

<sup>b</sup> Taken from [23].

<sup>c</sup> Based on Brazilian conditions and study calculations.

<sup>d</sup> Assumptions based on [23] and study calculations.

<sup>e</sup> Average values based on data from [18].

<sup>f</sup> Electricity mix for Brazil: 180 g CO<sub>2e</sub>/kWh.

<sup>g</sup> Assumed to be the same as Mexico.

**Table 3**  
Carbon content values used for LUC calculations.

		Cleared <sup>a</sup>	Dry forest <sup>b</sup>	Rainforest <sup>c</sup>
<b>Previous land cover</b>				
Total	tC/ha	25.4	89.3	148.8
In Biomass above and below ground	tC/ha	34.2	21.8	50.9
In Soil	tC/ha	87.2	67.7	98.1
<b>After LUC to sugarcane</b>				
Total	tC/ha	22.4	22.4	22.4
In Biomass above and below ground	tC/ha	12.8	12.8	12.8
In Soil	tC/ha	22.8	22.8	22.8

Source: study calculations based on data from INCB [33].

LUC – land use change.

<sup>a</sup> Includes low and mid tropical forests plus brush lands.

<sup>b</sup> High tropical forests.

by co-products are deducted. This procedure is recommended by the International Organization for Standardization (ISO) [36,37]. However, it may be difficult to apply substitution in many cases because one co-product can be utilized in more than one form and a choice has to be made about the type of substitution. In addition, data may not be available on life cycle emissions and substituted product energy values.

We used allocation by energy content for this study. The adopted Low Heating Values (LHV's) were as follows: 26.8 MJ/kg for ethanol and 16.5 MJ/kg for sugar. The avoided GHG emissions associated with the excess of electricity were taken to be equal to the amount of GHG that would be emitted when an equal amount of electricity was generated by the national grid.

### 3.5. Functional unit

The functional unit is a measure of the performance of a system. It is very important because enables results for alternative prod-

ucts to be compared in a meaningful manner, recognizing that the alternatives must be compared on the basis of the equivalent function which they perform or provide [18]. In this work for GHG emissions we have chosen the functional unit kgCO<sub>2e</sub>/G<sub>ethanol</sub> in equivalence to the established by the RED [1]. For the energy balance we assumed the relation G<sub>ethanol</sub>/G<sub>sugar</sub>.

## 4. Results

### 4.1. GHG emissions

Results of our GHG emission balances are expressed in CO<sub>2e</sub> emission units per ethanol energy unit (kgCO<sub>2e</sub>/G<sub>ethanol</sub>). Fig. 2 presents figures for the Brazilian case to allow for direct comparison against Mexican modalities. Fig. 2 also provides emissions of the reference fossil fuel proposed by the RED (83.8 kgCO<sub>2e</sub>/G<sub>ethanol</sub>) to ease the assessment of mitigation potentials.

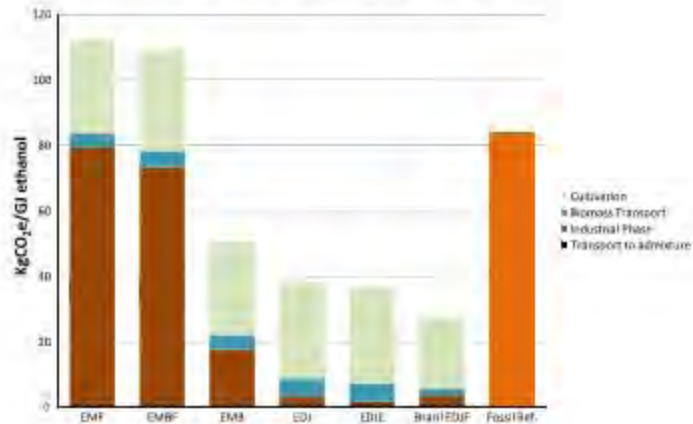


Fig. 2. GHG emissions without LUC.

It was necessary to include an ethanol transportation phase in the Brazilian case to have consistent system boundaries with Mexico. Ethanol emissions in Brazil are  $26.6 \text{ kgCO}_2\text{e/GJ}_{\text{ethanol}}$  without considering transportation to admixture plants. When transportation similar to that of Mexico is included, the ethanol emissions increase to  $27.5 \text{ kgCO}_2\text{e/GJ}_{\text{ethanol}}$ . None of the modalities analyzed in Mexico achieve higher mitigation than the Brazilian case.

The emission value for the reference fossil fuel was taken from [1] because reliable values for life cycle emissions of gasoline in Mexico do not exist at present.

GHG emissions are higher because of LUC when sugarcane cultivation expands to new growing areas. This increase in GHG emissions is especially important when rainforest is converted to

sugarcane crops. Under this hypothesis, all modalities generate emissions between 47% and 267% above the fossil reference. However, Johnson [7] estimates that it is possible to expand sugarcane cultivation on 2.9 million hectares of actual grasslands, both native and cultivated. GHG emissions are much lower when sugarcane expansions occur on grasslands, such as in the EMB, ED) and EDJE modalities (Fig. 3).

#### 4.2. Energy balance

Primary energy balances can be expressed as the ratio between primary fossil energy inputs to renewable energy output (Fig. 4). Only ethanol is produced under the various Mexican modalities.

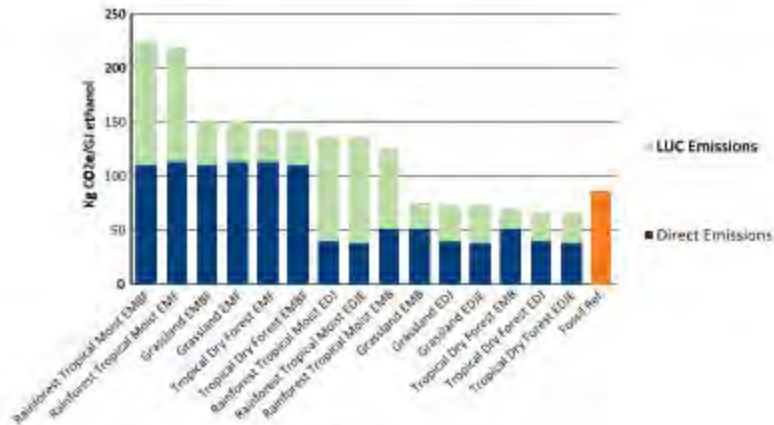


Fig. 3. GHG emissions with LUC.

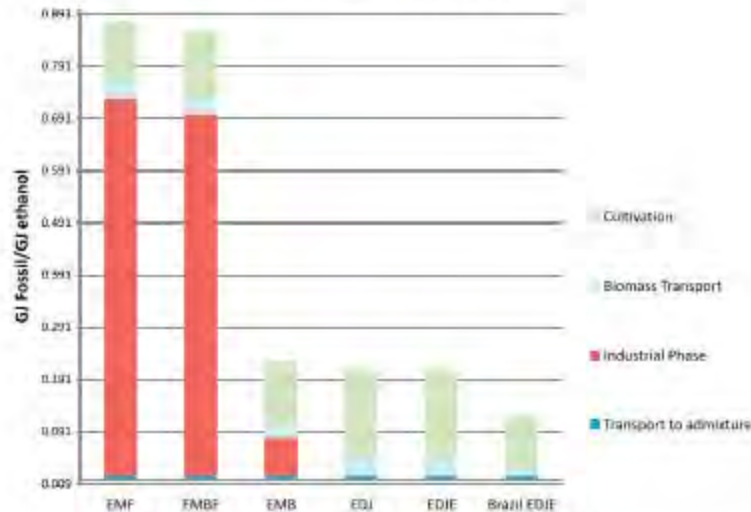


Fig. 4. Energy balances for ethanol production under Mexican and Brazilian modalities.

whereas ethanol and renewable electricity are obtained under Brazilian and EDJE modalities. This presentation of results allows us to show energy consumption at each production stage. Negative values during the industrial phase of Mexican EDJE and Brazilian EDJE modalities are due to electricity exports from mills to the energy grid.

A different way to express energy balance results involves using the ratio of renewable energy output to fossil energy input (Table 4). A ratio of one means that no energy gain is achieved by the ethanol production because the renewable energy obtained is equal to the fossil energy consumed. Ratios less than one mean that ethanol production provides less renewable fossil energy than the fossil energy consumed. Ratio values greater than one mean that energy gains are achieved in the process.

## 5. Discussion

### 5.1. GHG emissions

#### 5.1.1. Agricultural phase

Agricultural phase emissions were the most important in modalities EMB, EDJ, EDJE and Brazilian EDJE where they accounted for 56–81% of total emissions. However, agricultural phase emissions decreased to 25–28% under modalities EMF and EMBF where the industrial phase was the dominant GHG emissions source.

Variables of substantial impact on GHG emissions were identified. The variable with the greatest impact on GHG emissions involved the production of fertilizers, accounting for 37–46% of GHG emissions under Mexican modalities and 38% of GHG emissions in Brazil. In both cases, most of these values corresponded to  $N_2O$  emissions during fertilizer manufacture. The variable with the second highest GHG emissions involved burning sugarcane fields to ease harvest and clear residues, resulting in emissions of

$CH_4$  and  $N_2O$ . This field burning contributed 28% of emissions under EMF, EMBF and EMB cases and 31% of GHG emissions under EMB, EDJ and EDJE cases. This condition assumed that 95% of the sugarcane fields were burned in Mexico. About 65% of the area was burned in Brazil [16], and this source represented 35% of GHG emissions that corresponded to the agricultural phase. The third greatest contributor to GHG emissions was  $N_2O$  from soils derived from nitrogen fertilization. Assuming that 1% of the nitrogen content in fertilizers is volatilized as  $N_2O$ , as documented by the IPCC, this source of GHG represents between 11% and 14% of agricultural emissions in Mexico and 11% in Brazil. Although these percentages are similar among Mexico and Brazil, the absolute emission levels are much lower in Brazil because overall emissions are lower and less fertilizer is used. The relative high weight of fertilizer-derived emissions has already been discussed in other studies [34,38–40]. However, robust debate continues because recent research suggests that up to 5% of all nitrogen in fertilizers could be emitted as  $N_2O$  [41]. With this higher level, emissions in the total agricultural phase would increase from 28.4 to 44.8  $kgCO_{2e}/GJ_{ethanol}$  in EMF and EMB cases, 30.7–48.5  $kgCO_{2e}/GJ_{ethanol}$  in EMBF, from 29.5 to 44.6 in EDJ and EDJE, and 21.6–31.5 in the Brazilian case.

Emissions from diesel used by agricultural machinery represent 10% under modalities EMF and EMBF, 5% under modalities EMB, EDJ and EDJE, and 16% under the Brazilian EDJE case.

#### 5.1.2. Industrial phase

GHG emissions from the industrial phase accounted for 70% and 67% of total emissions under modalities EMF and EMBF, respectively. Conversely, GHG emissions from the industrial phase accounted for 33%, 7% and 3% of the GHG emissions under modalities EMB, EDJ and EDJE, respectively. The difference between modalities was due to the fuel used at mills. High emissions corresponded to mills where low-pressure, low-efficiency boilers

**Table 4**  
Energy balances of modalities for ethanol production in Mexico and Brazil, expressed as  $G_{ethanol}/G_{total}$ .

	EMF	EMBF	EMB	EDJ	EDJE	Brazil EDJE
$G_{ethanol}/G_{total}$	1.1	1.2	4.4	4.7	4.8	8.4

EMF – ethanol from 'C' molasses using bagasse and fuel oil.  
EMBF – ethanol from 'B' molasses using bagasse and fuel oil.  
EMB – ethanol from 'C' molasses using bagasse.  
EDJ – ethanol from direct juice using bagasse and without surplus electricity.  
EDJE – ethanol from direct juice using bagasse and generating surplus electricity.  
Brazil EDJE – Brazilian ethanol from direct juice using bagasse as a fuel and generating surplus electricity.

existed that did not allow for the generation of power surpluses and required both bagasse and fuel oil as supplementary fuels for process heat generation (EMF and EMBF).

Low emissions corresponded to mills that only used bagasse as fuel (EDJ, EDJE and Brazil). The modality EDJE had the lowest emissions in the industrial phase because surplus electricity was generated and delivered to the grid thereby avoiding emissions from power utilities. Assuming that high-pressure boilers are used, surplus electricity of 8.8 kW h/ $G_{ethanol}$  can be obtained, resulting in total emissions of 36.8 kg  $CO_{2e}/G_{ethanol}$  under modality EDJE. For higher efficiency boilers, a surplus of 50 kW h/ $G_{ethanol}$  can be achieved, resulting in total emissions of 24.9 kg  $CO_{2e}/G_{ethanol}$ . These figures show advantages of the efficient use of residual biomass as a process fuel as seen in Brazil [4,34,42].

### 5.3.3. Transportation phase

Transportation of sugarcane from fields to mills has a share of 4–15% of the overall GHG emissions. In all Mexican modalities, similar results of about 5 kg  $CO_{2e}/G_{ethanol}$  were determined. The geographical distance from fields to mills was the main factor in similar transportation outcomes, and this condition was similar in all Mexican cases. In addition, average travel distances were higher in Mexico than in Brazil, generating more emissions under this phase.

Transportation from distilleries to admixture facilities generates emissions of little significance. In Mexican modalities, its share was between 0.8% and 2.4% of total emissions. Doubling the distance from mills to admixture plants would increase this share to 1.6–4.8%. Thus, only long distances would produce significant increases in emissions under this phase. For example, using data from the California-GREET model [43] and assuming importation of ethanol from Brazil to the US, GHG emissions reach 17% from transportation alone because the distance from distilleries to admixture plants is over 12,000 km.

### 5.3.4. Land use change

Emissions due to LUC are of great significance when crop expansion is assumed under Mexican modalities. GHG emissions under the three types of previous land use considered possible for sugarcane crop expansion: grasslands, dry forest, and rainforest; results in very different emissions, ranging from a net GHG reduction of 24% under modality EDJE on tropical dry forest lands to a net GHG increase of 267% under modality EMBF on rainforest relative to reference fossil fuel emissions. This wide disparity in emissions clearly shows that the expansion of sugarcane cultivation to lands of high carbon content would actually increase GHG emissions as already concluded by other authors [30–32].

### 5.3.5. Allocation

Allocation values by energy content were 26.8 MJ/kg for ethanol and 16.5 MJ/kg for sugar, while by economic value the estimated allocation values were 0.6 USD/kg for ethanol and 0.286 USD/kg for sugar. Allocation by economic value resulted in higher alloca-

**Table 5**  
 $CO_{2e}$  emissions for different allocation methods with sugar as a co-product (kg  $CO_{2e}/G_{ethanol}$ ).

	Energy allocation	Economic allocation
EMF	112.1	123.4
EMBF	126	138.2
EMB	57.8	55.3

EMF – ethanol from 'C' molasses using bagasse and fuel oil.  
EMBF – ethanol from 'B' molasses using bagasse and fuel oil.  
EMB – ethanol from 'C' molasses using bagasse.

tion values under all modalities, including 10% more under modalities EMF, 5% more under modality EMBF, and 17% more under modality EMB (Table 5). Higher ethanol emissions have been reported by other authors when the economic value method was chosen [17,34,35]. A 30% increase in the price of ethanol with sugar prices kept constant resulted in an increase of GHG emissions allocated to ethanol of 21% for EMF, 18% for EMBF, and 38% for EMB. This relationship shows the importance of the method for allocation, and its effect on the assessment of GHG mitigation when ethanol is used in the transportation sector.

## 5.2. Energy balance

### 5.2.1. Agricultural phase

Results of this study show that the main energy used corresponded to industrial and agricultural phases. In modalities EMB, EDJ and EDJE, the agricultural phase represents from 52% to 81% of all the energy used. These results are similar to the Brazilian case where energy use in the agricultural phase was 83%. For modalities EMF and EMBF, the energy used in the agricultural phase was 0.12 and 0.13  $G_{fossil}/G_{ethanol}$ . These results were similar to modality EMB with energy use values of 0.13  $G_{fossil}/G_{ethanol}$ . However, EMF and EMBF values represent only 13–15% of the total energy used because fuel-oil is also used in the industrial phase. The primary energy used in the agricultural phase of the Brazilian case was lower than in Mexican modalities because lesser amounts of fertilizer are applied to Brazilian crops, resulting in lower energy ratios.

### 5.2.2. Industrial phase

Bagasse use as an energy source in the industrial phase was a major factor in the balance of primary energy as reported in other works [4,44]. This was easily seen in modalities EMF and EMBF where the industrial phase represented 82% of the fossil energy used over the entire life cycle because fuel oil is needed as supplementary fuel in boilers. Under modality EMB, there was also substantial fossil fuel energy use because of the need to import electricity from the national grid.

### 5.2.3. Transport phase

Sugarcane transportation from fields to mills accounted for 3–17% of the primary fossil energy demand under Mexican modalities. In the Brazilian case, fossil fuel demand and resulting GHG emissions were lower than in Mexico because growing areas are closer to industrial processing plants and high tonnage trucks make the Brazilian transportation system more efficient. The transportation of ethanol to admixture plants was of marginal significance in Mexico, representing 1–3.7% of all fossil energy demand.

## 6. Conclusion

Three modalities for ethanol production in Mexico showed lower GHG emissions than the reference fossil fuel. The best modality was EDJE with 36.8 kg  $CO_{2e}/G_{ethanol}$ , followed by EDJ with

35.4 kgCO<sub>2</sub>e/C<sub>10H<sub>16</sub>O<sub>5</sub>). None of the Mexican modalities achieved lower emissions than the Brazilian case (27.5 kgCO<sub>2</sub>e/C<sub>10H<sub>16</sub>O<sub>5</sub>) this is due to the following reasons: because less fertilizer is applied to sugarcane in Brazil than in Mexico, due to the smaller proportion of sugarcane areas that were burned to facilitate manual harvest; due to the shorter distance of sugarcane transport; and because fossil fuel energy is not used in the industrial phase. Emissions due to LUC associated with the expansion of crop areas are the main contributors to the total GHG emissions in Mexico, especially when this expansion occurs on lands of high carbon stock such as tropical rain forests.</sub></sub>

Sugarcane field burning to ease manual harvesting is another important source of emissions, suggesting that mechanized harvest without previous burning is preferable. However, mechanized harvesting increase the amount of diesel fuel needed for harvest operations. Other important sources of emissions are related to N<sub>2</sub>O volatilization from fertilizer applications and production. Enhanced efficiency of fertilization and increased biofertilizers to substitute for chemical nitrogen fertilizers would help reduce emissions. Diesel fuel use had an important share in emissions as shown in the Brazilian case where diesel consumption was high because of higher degrees of harvest mechanization.

The efficient use of bagasse as a fuel in the industrial phase was a major factor in achieving emission reductions. Results clearly show that modalities demanded fuel oil as a supplementary fuel to generate high GHG emissions. In the transportation phase, the most important factor was the distance from fields to mills, followed by distance from mills to admixture plants. Thus, more compact growing areas of sugarcane around distilleries and higher efficiency of transportation vehicles would help reduce emissions from the transportation phase.

The energy balance for all modalities was positive, resulting in energy ratios greater than one. This implies that more ethanol energy was obtained than fossil energy consumed, and all modalities evaluated were “energetically cost-efficient”. Modalities with the highest energy ratio in Mexico were EDJE (4.8 GJ<sub>ethanol</sub>/GJ<sub>fossil</sub>) followed by ED (4.7 GJ<sub>ethanol</sub>/GJ<sub>fossil</sub>), both of which were lower than the Brazilian case (8.4 GJ<sub>ethanol</sub>/GJ<sub>fossil</sub>). The main components of primary fossil energy consumption were as follows: fertilizer production and diesel oil use by machinery in the agricultural phase; fuel oil use in the industrial phase; and diesel oil use by sugarcane and ethanol trucks in the transportation phase. Energy ratios in Mexico could be improved by implementing the following: Enhancing fertilizer efficiency; limiting fuel usage to bagasse in the industrial phase; compacting sugarcane growing areas; and increasing the efficiency of transportation systems.

#### Acknowledgement

This study was supported by: Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTA) GmbH, and projects Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energetica No. 117808 and PAPIIT-UNAM No. IN118208.

#### References

- [1] EU (Commission of the European Communities). DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and supplementing Directive 2001/77/EC and 2003/55/EC. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=CELEX:32009L0028:en:PDF>.
- [2] IEA. Renewable Policy Assessment; 2020. <http://www.iea.org/energy/industry/industry>.
- [3] C Deceler, J. Uno SS, Vermeiren GJ, Váñez EE, Castillo EF, Almeida D, et al. Societal environment, technology and food security. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;13:1274–87.
- [4] Colmenarejo J, Tena-Sempere M, Guardado J. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* 2008;36:2282–97.
- [5] PROYAC (Programa Nacional de la Agroindustria de la Cafa de Azúcar), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), México; 2007.
- [6] UNO (Unión Nacional de Cafeteros); 2020. <http://www.unocaf.org.mx/>.
- [7] Gilman T, Adams C, Basso D, Liu T. “Misión: Decreto para la Eliminación de Emisiones de Carbono”. INECC; The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank; 2020.
- [8] UNO (Unión Nacional de Cafeteros) y Desarrollo de los Biocombustibles, Centro Oficial de la Federación; February; México; 2020.
- [9] SENER (Secretaría de Energía), Programa de Innovación de Biocombustibles; México; 2020.
- [10] Shapouri H, Duffield, Wang W. The energy balance of corn ethanol in an open agricultural economy report no. 813. USDA; 2002.
- [11] Fatsis T. Thermodynamics of the corn-ethanol biocycle cycle. *Oil Res Plant Sci* 2004;13(3):316–27.
- [12] Fatsis T. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood. *bioRxiv* production using soybean and sorghum. *Oil Res Plant Sci* 2020;13A:83–95.
- [13] IFU, Quirin M, Gärner SG, Fehre M, Reinhardt GA. CO<sub>2</sub> mitigation through biofuels in the transport sector. Status and perspectives. Germany; 2004.
- [14] Das D, Divina M, Vaughan J, K, Nyikal S. Ethanol as a fuel energy: carbon dioxide balance, and ecological impacts. *BioScience* 2005;15:104–13.
- [15] F Farnel A, Felton R, Turner ST, Jones AD, Z Hare S, Sparrow DM. Ethanol can help to meet the UK’s environmental goals. *Science* 2005;311:405–8.
- [16] Macedo J, Duarte J, Silva J. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2020–2020 averages and a prediction for 2020. *Biomass Bioenergy* 2020;127:1054–65.
- [17] Granados E, Duran A, Villegas J, Pacheco L. Life cycle assessment of bioethanol energy and greenhouse gas balance. *Biomass Bioenergy* 2020;130:10476–82.
- [18] Egeyol MA, Satchero S, Hammer NC. Carbon and energy balance for a range of bioethanol systems. Project No. 3-00-0004-000-1-00. CSREB; Program carried out as part of the 200 Sustainable Energy Programme. <http://www.melbourne.unimelb.edu.au/3-00-0004-000-1-00/2004-000-1-00.pdf>.
- [19] Thomsen T, Murphy G. Is it better to import palm oil from Thailand or produce bioethanol in Ireland than to produce bioethanol from indigenous Irish rape seed? *Appl Energy* 2020;262:1074–84.
- [20] INE (Instituto Nacional de Ecología), Dirección de Economía Ambiental, Propuesta de certificación como instrumento para regular la producción y uso de biocombustibles en México. Propuesta de Consultoría presentada por C. A. Corporación de Servicios Profesionales, México; 2008.
- [21] INE, Dirección de Economía Ambiental, Análisis de tres casos específicos para producción de bioetanol en México a partir de soja, utilizando el método life cycle para evaluación energética y ambiental. Propuesta de Consultoría presentada por C. A. Corporación de Servicios Profesionales, México; 2008.
- [22] INE, Dirección de Economía Ambiental, La certificación como instrumento para regular la producción de los biocombustibles en México. Propuesta de Consultoría presentada por C. A. Corporación de Servicios Profesionales, México; 2008.
- [23] SENER, BID, GTZ. Potenciales y Viabilidad del uso de Biomasa y Bioetanol para el Transporte en México; México; 2005.
- [24] Enriquez PA. Prospectiva de la Coprocesación de la Agroindustria de la Cafa de Azúcar en México. Reunión del “10 Simposio Nacional 820: Mecánica de Bioenergía y Simposio Internacional de Proyectos Bioenergéticos; México; 2005.
- [25] Nettekoven H, Dieguchi J, Reinhardt C, Schmidt J, Sauer U, Orlow M, et al. Criteria for a sustainable use of bioenergy on a global scale. Environmental research of the federal ministry of the environment, nature conservation and nuclear safety. Research report 202-41. 112.024-78.001/1703; Germany; 2020. [http://www.umwelt.de/medien/024178001/1703\\_Report\\_criteria\\_for\\_sustainable\\_bioenergy\\_1204.pdf](http://www.umwelt.de/medien/024178001/1703_Report_criteria_for_sustainable_bioenergy_1204.pdf).
- [26] IPCC. Third assessment report – climate change 2001 – complete online version. [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/Ferretations/ipcc\\_tar/ing1/248.html](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/Ferretations/ipcc_tar/ing1/248.html).
- [27] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 4. Energy, Agriculture, forestry and other land use; 2003.
- [28] SENER. Balance Nacional de Energía 2007. Secretaría de Energía. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Director General de Información y Estudios Energéticos; México; 2008.
- [29] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 3. Energy; 2003.
- [30] Seitzinger T, Helmrich R, Houghton RA, Dong F, Blalock A, Fabiana J, et al. Use of US croplands for biofuel increases greenhouse gases through emissions from land use change. *Science* 2008;319:1226–30.
- [31] Bergante J, Hill J, Turner D, Toksky S, Haverdome P. Land clearing and the initial carbon debt. *Science* 2008;319:1235–8.
- [32] Skeltonová T, Chmelová SH, Šteplová M. Impact of Thai bioethanol policy on crop land use and greenhouse gas emissions. *Appl Energy* 2020;265:11570–7.
- [33] INECC. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990–2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología; México; 2020.
- [34] Borekova P. Good and bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what do we really need? *Appl Energy* 2020;262:1074–84.
- [35] Nettekoven H, Houghdregg W. Solutions for Road Transport: A Guide to Vehicle Emissions. Springer; 2020.
- [36] ISO 15020 Norm 14240:2020 and 14244:2020. Life cycle assessment: principles and framework. Environmental Management; 2020.



