



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“Planeación óptima de la cadena de suministro en la
producción de *Ambrox*®”**

TESIS presentada por:

Sergio Iván Martínez Guido

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: **Doctor en Ciencias en Ingeniería Química José María Ponce Ortega**

Co-asesor: **Doctor en Ciencias en Ingeniería Química Fabricio Nápoles Rivera**

Morelia, Michoacán

Febrero del 2015

Abstract

Optimal planning of the supply chain in the *Ambrox*® production

By

I.B.Q. Sergio Ivan Martinez Guido

February of 2015

Master in Chemical Engineering Sciences

Guided by Dr. Jose Maria Ponce Ortega

In the perfumery industry the fixatives are the most costly inputs which generate the greater adverse environmental impact, the most obvious case is the ambergris due to sacrifice of animals that involves. In this way, its synthetic equivalent *Ambrox*® has been widely used; however, until nowadays the synthesis is complicated and highly costs are involved. So in this way this thesis presents the optimal planning of the supply chain for *Ambrox*® production study, from a new chemical route, in which is necessary just one chemical step and also involves the use of an endemic plant from the Michoacán state. This analysis first proposed a model optimization for the global chain value involving all the stages of the process and in the objectives functions are considering the economics, environmental and social aspects. The solution of the proposed model is shown through Pareto curves, that identify solutions that compensate all the objectives considered. From the obtained results is possible identify attractive solutions for all the objectives involved.

Additionally, in this thesis an optimization for us of the residues generated in the Mexican sugar industry and its subsequent use as raw material in the biofuels production is presented.

Word keys: Fixatives, *Ambrox*®, *Supply Chain*, *Optimization*

IBQ. Sergio Iván Martínez Guido

RESUMEN

Planeación óptima de la cadena de suministro en la producción de *Ambrox*®

Por

I.B.Q. Sergio Iván Martínez Guido

Febrero del 2015

Maestría en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

En la industria de la perfumería fina los fijadores representan uno de los insumos más costoso y que mayor impacto ambiental adverso generan, siendo el caso más evidente el del ambergris ya que involucra el sacrificio de especies animales. En este sentido, su equivalente sintéticos conocido como *Ambrox*® ha sido ampliamente usado; sin embargo, hasta el momento su síntesis es complicada e involucra un. En este sentido, el presente trabajo de investigación presenta el estudio de la planificación óptima de la cadena de suministro para la producción de *Ambrox*® a partir de una nueva ruta química en un solo paso y que además involucra el uso de una planta endémica del estado de Michoacán. Para este análisis se propuso primeramente un modelo de optimización para la cadena de valor global que involucra todas las etapas del proceso y que considera como funciones objetivo aspectos económicos, ambientales y sociales. La solución del modelo propuesto es mostrada a través de curvas Pareto que permiten identificar soluciones que compensan los diversos objetivos considerados. De los resultados obtenidos se identifican soluciones atractivas para todos los objetivos considerados.

Adicionalmente, en el presente trabajo se presenta un estudio de optimización para el uso de los residuos generados en la industria azucarera mexicana y su posterior empleo como materia prima en la producción de biocombustibles.

Palabras clave: Fijadores, Cadenas de Suministro, *Ambrox*®, Optimización

IBQ. Sergio Iván Martínez Guido

Dedicatoria

A Dios

Por haberme guiarme a lo largo de mi vida, y darme la oportunidad de realizar mis sueños profesionales.

A mi madre Maclovia Guido Ponce

Mi fiel guerra invencible, por haberme dado la vida, amor y apoyo incondicional de madre, y ser mi profesora en la materia de la vida; que gracias a sus esfuerzos y sacrificios hoy en día soy el hombre en el que me he convertido educado por una reina, un logro más compartiéndolo contigo.

A mi hermana Miriam Gretel Martínez Guido

Mi amiga, mi confidente, mi guía, mi hermana, gracias por hacer de esta etapa un momento más grato lleno de alegría, aprendiendo juntos, y apoyando para nunca rendirme y seguir siempre adelante.

A mi papá German Martínez García

Hoy puedo contestar a esa pregunta que algún día me hicieron ¿Eso le enseñó su papá de ser un hombre? Con la cabeza en alto lleno de orgullo y decir SI, me enseñó a superarme día tras día y a levantarme cuando me caigo y enmendar mis errores, gracias papá donde quiera que estés.

A mi querido Valens Andrade Romero

Gracias por hacer de este camino un camino más fácil lleno de nuevas experiencias, esperanzas y cambios a mi vida.

A mis amigas inseparables Mariana, Olimpia, Claudia y Ceci

Hemos vivido tantas cosas juntos que con ello comprobamos que los amigos son familia que uno elige, y sinceramente me alegro de haberlas elegido, estancias, consejos apoyos, lagrimas, logros tantas cosas compartidas y cosas que faltan por compartir juntos. Gracias.

ÍNDICE

ABSTRACT.....	II
RESUMEN.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
NOMENCLATURA.....	XI
Capítulo 1.....	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1.1. Cadenas de suministro	2
1.1.2. Sustentabilidad	3
1.1.3. Integración de procesos	4
1.1.4. Optimización	4
1.1.4.1. GAMS.....	5
1.1.4.2. Características del sistema.....	5
1.1.4.3. Tipos de modelos soportados	6
1.2. ANTECEDENTES.....	7
1.3. HIPÓTESIS	8
1.4. OBJETIVOS.....	9
1.4.1. General.....	9
1.4.2. Particulares:	9
1.5. METODOLOGÍA	10

Capítulo 2	12
2. PLANEACIÓN ÓPTIMA DE LA CADENA DE SUMINISTRO EN LA PRODUCCIÓN DE AMBROX®	13
2.1. PANORAMA GENERAL.....	13
2.2. AMBROX® SINTÉTICO	13
2.2.3. Ageratina jocotepecana	14
2.2.4. Síntesis de Ambrox® a partir de Ageratina jocotepecana	15
2.2.5. Principales resultados	15
2.3. PROBLEMÁTICA A RESOLVER.....	16
2.4. ESTRATEGIA USADA PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA	16
2.4.1. Diseño de la superestructura.....	16
2.5. MODELO MATEMÁTICO	19
Función objetivo.....	28
2.6. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	28
Sitios de cultivo	28
Rendimientos	29
Empleos	30
Costos	31
2.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	33
2.7.1. Área de cultivo.....	33
Capítulo 3	44
3. CASO DE ESTUDIO 2. RECONFIGURACIÓN ÓPTIMA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE BIOEREFINERÍAS	45
3.1. PANORAMA GENERAL.....	45
3.2. PROBLEMÁTICA.....	45
3.3. METODOLOGÍA.....	46

3.4. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO.....	47
3.5. CASO DE ESTUDIO	52
3.6. RESULTADOS	52
3.6.1. Escenario A (Situación actual)	52
3.6.2. Escenario B (Producción de bioetanol a partir de residuos).....	53
3.6.3. Escenarios C, D, E, F: Reducción en la producción de azúcar.....	53
3.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	54
3.7.1. Impacto ambiental	55
3.7.2. Impacto económico.....	56
3.7.3. Impacto social:.....	59
4. CONCLUSIONES	60
5. ANEXOS.....	62
6. Referencias	71

Índice de Tablas

	Página
Tabla 2.1. Área disponible para el cultivo <i>AJ</i>	29
Tabla 2.2 Rendimientos y producción <i>Ambrox</i> ® y bioetanol.....	30
Tabla 2.3. Empleos generados en los sitios de cultivo.....	30
Tabla 2.4. Empleos generados en el proceso de manufacturación.....	31
Tabla 2.5. Costos de materia prima.....	32
Tabla 2.6. Costos de producción de <i>Ambrox</i> ®.....	33
Tabla 2.7. Empleados generados y costos asociados con la producción de <i>AJ</i>	37
Tabla 2.8. Generación de empleos por la producción de <i>Ambrox</i> ® y bioetanol.....	37
Tabla 2.9. Valores para los daños ambientales asociados a la producción de bioetanol.....	37
Tabla 2.10. Valores asociados a los daños ambientales por el cultivo de <i>AJ</i>	38
Tabla 2.11. Valores del daño ambiental asociado con la producción de <i>Ambrox</i> ®.....	39
Tabla 2.12. Comparaciones de los resultados económicos (US\$/año).....	39
Tabla 2.13. Resultados para empleos generados.....	39
Tabla 2.14. Resultados para el impacto ambiental (Eco-puntos-EI99/año).....	40
Tabla 3.15. Residuos obtenidos de la producción de azúcar.....	53
Tabla 3.16. Análisis de ciclo de vida, preparación de suelo.....	63
Tabla 3.17. Análisis de ciclo de vida, plantación de caña de azúcar.....	63
Tabla 3.18. Análisis de ciclo de vida, aplicación de químicos en el cultivo.....	64
Tabla 3.19. Análisis de ciclo de vida de la cosecha.....	65
Tabla 3.20. Análisis de ciclo de vida de producción de bioetanol.....	66
Tabla 3.21. Análisis de ciclo de vida de la cogeneración de energía eléctrica.....	66

Tabla 3.22. Análisis de ciclo de vida de la distribución de bioetanol.....	67
Tabla 3.23. Análisis de ciclo de vida del uso de bioetanol.....	67
Tabla 3.24. Impacto ambiental: Daño a la salud humana.....	68
Tabla 3.25. Impacto ambiental: Daño a la calidad del ecosistema.....	69
Tabla 3.26. Impacto ambiental: Daño a los recursos naturales.....	70

Índice de Figuras

	Página
Figura 1.1 Diseño cadena de suministro.....	2
Figura 1.2 Diferentes opciones para obtener un producto bajo distintas condiciones.....	5
Figura 1.3 Diagrama de la metodología.....	10
Figura 2.4 <i>Ageratina jocotepecana</i>	14
Figura 2.5 Diagrama de flujo para la obtención de <i>Ambrox</i> ® a partir de <i>Ageratina jocotepecana</i> a nivel laboratorio.....	15
Figura 2.6 Superestructura de la cadena de suministro en la producción de <i>Ambrox</i> ®, contemplando tipo de suelo.....	17
Figura 2.7 Superestructura de la cadena de suministro en la producción de <i>Ambrox</i> ®, contemplando tipo de clima.....	18
Figura 2.8 Diagrama de impacto ambiental.....	26
Figura 2.9. Producción de <i>Ambrox</i> ®.....	32
Figura 2.10. Áreas necesarias para cultivo de <i>Ageratina jocotepecana</i>	34
Figura 2.11. Comparación entre los objetivos ambientales y rendimientos.....	35
Figura 2.12. Solución del escenario A.....	41
Figura 2.13. Configuración de la cadena de suministro asociada al escenario B.....	42
Figura 2.14. Configuración de la cadena de suministro asociada al escenario C.....	43
Figura 3.15. Reconfiguración de ingenios a biorefinerías.....	46

Figura 3.16. Composición de la caña de azúcar.*(Comisión Veracruzana, 2010).....	47
Figura 3.17a. Distribución de las materias primas para la integración de la biorefinería.....	48
Figura 3.17b. Proceso de producción de azúcar primera sección (Sección B).....	49
Figura 3.17c. Proceso de producción de azúcar segunda sección (Sección C).....	50
Figura 3.17d. Biorefinería tercera sección (Sección D).....	51
Figura 3.18. Curva Pareto para diferentes escenarios.....	55
Figura 3.19. Principales resultados para el caso de estudio.....	58

NOMENCLATURA.

2.2.1. Parámetros

$A_i^{existing}$	Área existente con <i>AJ</i> silvestre en el sitio <i>i</i> , (ha)
A_i^{max}	Área total en el sitio <i>i</i> (ha)
$C_{i,p}^F$	Costo fijo asociado a la capacidad instalada de cada planta de pre-procesamiento (US\$/ton)
$C_{cen,p}^F$	Costo fijo asociado a la capacidad de la planta central (US\$/ton)
$C_i^{harvest}$	Costo unitario para el cultivo de <i>AJ</i> (US\$/ha)
$C_i^{process}$	Costo unitario de procesamiento (US\$/ton)
$C_i^{trans-ambrox}$	Costo unitario de procesamiento para la producción de Ambrox ® en la planta central (US\$/ton)
$C_i^{transpo-ambrox}$	Costo unitario de transporte para Ambrox ® de las plantas distribuidas a la central (US\$/ton)
$C_{im2}^{transpo-ethanol}$	Costo unitario de transporte de bioetanol (US\$/galón)
$C_i^{transpo-plant}$	Costo unitario de transporte de material prima (US\$/ton)
$C_{m2}^{trans-ethanol}$	Costo unitario de transporte de bioetanol a los mercados (US\$/galón)
$C_{m1}^{transp-ambrox}$	Costo de transporte de Ambrox ® a los mercados (US\$/ton)
$F_{Aj,central,p}^{lower}$	Flujo mínimo de tallo procesado en la planta central (ton)
$F_{Aj,i,p}^{lower}$	Flujo mínimo de tallo procesado en cada planta de pre-procesamiento (ton)
$F_{Aj,central,p}^{upper}$	Flujo máximo de tallo procesado en la planta central (ton)
$F_{Aj,i,p}^{upper}$	Flujo máximo de tallo procesado en cada planta de pre-procesamiento (ton)

$n_i^{harvest}$	Empleos generados por el cultivo <i>AJ</i> (empleos/ha)
$n_i^{process}$	Empleos generados por el procesamiento en la unidad central (empleos/ton)
$n_i^{transambrox}$	Empleos generados por transporte de Ambrox ® de las plantas distribuidas a la planta central (empleos/ton)
$n_{i,m2}^{transethanol}$	Empleos generados por transporte de bioetanol de las plantas distribuidas a la planta central (empleos/gal)
$n_i^{transportplant}$	Empleos generados por el transporte de <i>AJ</i> a la unidad central de procesamiento (empleos/ton)
$n_{m1}^{transportambrox}$	Empleos generados por el transporte de Ambrox ® a los mercados (empleos/ton)
$n_{m2}^{transportethanol}$	Empleos generados por el transporte de bioetanol a los mercados (empleos/gal)
$Price_{m1}^{ambrox}$	Precio del Ambrox ® (US\$/ton)
$Price_{m2}^{ethanol}$	Precio del bioetanol (US\$/galón)
P^{ambrox}	Ambrox ® producido en la planta central (ton)
$P^{ethanol}$	Bioetanol producido en la planta central (galones)
P_{m1}^{ambrox}	Demanda de Ambrox ® (ton/año)
$P_{m2}^{ethanol}$	Demanda de bioetanol (galones/año)
α_i	Porcentaje de tallo producido por hectárea en el sitio <i>i</i> , (ton/ha)
β_i^{ambrox}	Factor de conversión de tallo a Ambrox ®
$\beta_i^{ethanol}$	Factor de conversión de tallo a bioetanol
γ^{ambrox}	Factor de conversión de tallo a Ambrox ® en la planta central

$\gamma^{ethanol}$ Factor de conversión de tallo a bioetanol en la planta central

2.2.2. Variables

A_i Área para cultivo (ha)

A_i^{new} Área nueva necesaria (ha)

$C_{prepropla,i,p}^{capprocess}$ Costo de capital asociado a cada planta de procesamiento (US\$/año)

$C_{central,p}^{capprocess}$ Costo de capital asociado a la planta central (US\$/año)

$C_{cen,p}^V$ Costo variable asociado a la planta central (US\$/ton)

$C_{i,p}^V$ Costo variable asociado a cada planta de pre-procesamiento (US\$/ton)

$Cost$ Costo total de capital (US\$/año)

$DF_{Aj,i,p}$ Variable desagregada de flujo de tallo procesada en la unidad de pre-procesamiento

$DC_{i,p}^{Cap}$ Variable desagregada de costo capital en la unidad de pre-procesamiento

EI_{Global} Impacto ambiental generado por la cadena de suministro (Eco-puntos/año)

EI_{ambrox} Impacto ambiental generado por la producción de **Ambrox**® (Eco-puntos/año)

$EI_{bioethanol}$ Impacto ambiental generado por la producción de bioetanol (Eco-puntos/año)

$EI_{rawmaterial}$ Impacto ambiental generado por el cultivo de material prima (Eco-puntos/año)

F_i Cantidad de *AJ* producida en el sitio *i* (ton/ha)

f_i Flujo de tallo enviado a las unidades de pre-procesamiento (ton/año)

$F_{Aj,i}$ Flujo de tallo procesado in en cada unidad de procesamiento (ton/año)

$F_{central}$ Cantidad de tallo procesado en la planta central (ton/año)

g_i^{ambrox}	Ambrox ® producido en las unidades de pre-procesamiento (ton/año)
$g_i^{ethanol}$	Bioetanol producido en las unidades de pre-procesamiento (galones/año)
h_i	Flujo de tallos enviados a la planta central (ton/año)
M^{ambrox}	Ambrox ® producido (ton/año)
$M^{ethanol}$	Bioetanol producido (galones/año)
N_{jobs}	Empleos generados (empleos/año)
NP	Rendimiento (US\$/año)
$P_{m1}^{max\ ambrox}$	Demanda de Ambrox ® que se satisface (ton/año)
$P_{m2}^{max\ ethanol}$	Demanda de bioetanol que se satisface (galones/año)
$Profit$	Rendimiento total (US\$/año)
S_{m1}^{ambrox}	Cantidad de Ambrox ® vendido (ton/año)
$S_{m2}^{ethanol}$	Cantidad de bioetanol vendido (galones/año)
$Sales$	Ventas (US\$)
Y_p^c	Variable binaria que declara la existencia o no de la unidad central de procesamiento
$Y_{p,i}$	Variable binaria que declara la existencia o no de las plantas de pre-procesamiento

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial y supervivencia de cada empresa se delimita principalmente por los problemas que afectan la viabilidad y factibilidad de dar valor agregado a un producto, y la manera en hacer frente a éstos. En décadas pasadas, el principal obstáculo era simplemente asegurar la disponibilidad del suministro de materias primas, con el objetivo de sostener el producto bajo los estándares de calidad y costo competitivo. Hoy en día, las industrias enfrentan cambios globales complejos, tales como competir con bajo costo, los precios de las materias primas, fluctuación de los precios de los productos básicos, el aumento de las expectativas que el cliente demanda y las condiciones económicas volátiles. Adicionalmente se tiene la necesidad de una simbiosis industrial, en la que se mejore la sustentabilidad regional y a la vez el desarrollo de la empresa, y en la mayoría de los casos coexista la colaboración entre diferentes empresas ya sean del mismo o distinto rubro, promoviendo el uso eficiente de los materiales y energía (Zhu & Ruth, 2014; Madani & Zbigniew, 2014). Como resultado a la problemática anterior, se ha optado por proponer metodologías basadas en la integración y optimización de procesos (El-Halwagi et al. 2011; Ponce-Ortega et al. 2012) que permitan el estudio y análisis completo de la cadena de valor, y además generar una visión de su interacción con otras industrias, promoviendo una mejora continua, pero rigiéndose bajo normas y políticas establecidas. Estos procesos se analizan con base en variables de procesos de las cuales se puede tener un control, que aunados a los parámetros involucrados se pueden llegar a cumplir con las funciones objetivo (meta planteada, la cual puede ser el disminuir el impacto ambiental y aumentar el rendimiento).

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1. Cadenas de suministro

Las cadenas de suministro son sistemas con cuatro elementos principales interconectados: los proveedores, el proceso de fabricación, la distribución (transporte) y los clientes (ver Figura 1.1); cada uno de ellos da lugar a una estructura compleja en la que se contemplan distintos factores (proveedores, producción, transporte y manipulación de materia prima) cuyo comportamiento afecta directamente el rendimiento de todo el sistema de producción que se esté valorando. Por ejemplo, si la demanda del cliente se sobrepasa, se tendría un cuello de botella que afecta principalmente a los sitios de almacenamiento, impidiendo la capacidad de ejecución de la cadena de suministro, y con ello impactando fuertemente en la parte económica y su consecuente daño al capital, lo que puede impedir el desarrollo y sostenimiento de la empresa (Grossmann *et al.*, 2003).

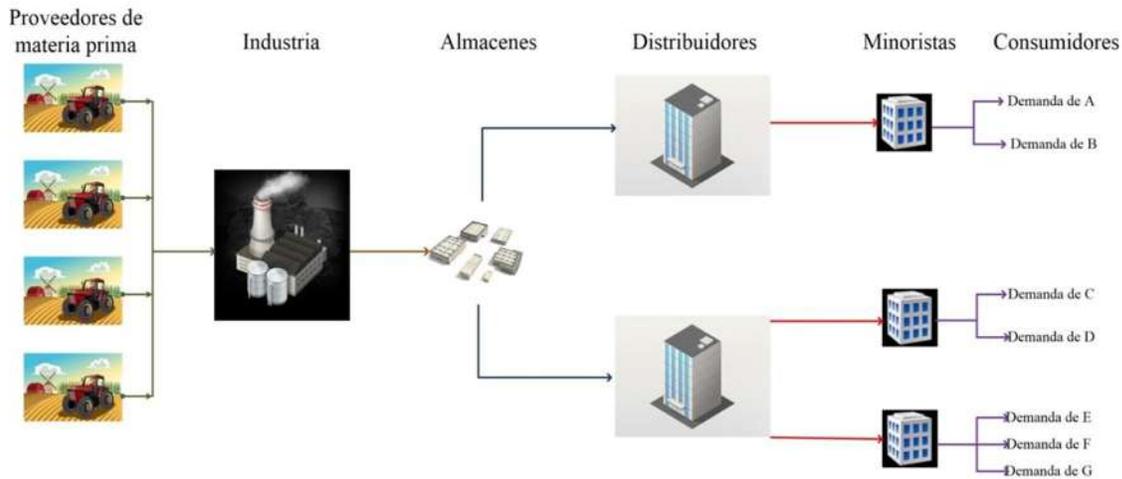


Figura 1.1 Diseño cadena de suministro.

Es por esta razón que al tomar una decisión para el funcionamiento rentable de la cadena de suministro de cualquier proceso industrial, es necesario tener en cuenta todas las interacciones y limitaciones entre los elementos mencionados, para así formular planes operativos que brinden los mejores resultados (Su *et al.*, 2008). Para lograr este objetivo, los gerentes deben considerar en sus cadenas de suministro los factores de operación y las limitaciones, tales como los tiempos de procesamiento, capacidad de producción, disponibilidad de materias primas, los niveles de inventario, los tiempos de transporte y así sucesivamente, para definir el orden de las políticas y

planes de fabricación para satisfacer la demanda. Aunado a esto, se debe contemplar la dinámica de los mercados, tales como cambios en demanda, cancelaciones, el desarrollo de nuevos productos, devoluciones, etc. Debido a la complejidad que representa la toma de este tipo de decisiones, las respuestas a la mejor configuración del proceso entero no suelen ser triviales, es por ello que se debe de echar mano de herramientas que den soporte, y con ello poder guiar redituablemente la cadena de suministro involucrada para cada proceso industrial.

1.1.2. Sustentabilidad

La sustentabilidad se puede definir como la capacidad de mantener la viabilidad de un sistema dado. En este contexto, el desarrollo sostenible implica que las acciones actuales no deben perjudicar a las generaciones futuras y que se necesitan indicadores medibles para asegurar el cumplimiento (El-Hawalagi, 2012). Para los procesos industriales, los indicadores relevantes son las tasas de consumo de recursos y las emisiones de efluentes. Estos factores se expresan normalmente en términos de "huellas"; por ejemplo, la huella de carbono (CFP) y/o huella hídrica (PMA) de un proceso. La sostenibilidad de un proceso industrial depende de minimizar estas huellas. Para los problemas de síntesis y diseño, los indicadores medidos deben aplicarse al ciclo de vida completo del sistema propuesto como parte de una evaluación del ciclo de vida (LCA) (Klemes, 2011).

En la actualidad, la sustentabilidad juega un papel clave en la gestión de una industria responsable; para cumplir con este objetivo es necesario considerar tres aspectos importantes. El primero de ellos es la evaluación mediante herramientas que consideren el aspecto económico, social y medioambiental, el segundo es encontrar los indicadores adecuados así como reunir los datos necesarios para cuantificar el desempeño de la sostenibilidad, y por último la sostenibilidad debe de ser vista en el contexto global del proceso; es decir, se deben incluir todas las actividades a lo largo de la cadena de valor del proceso en cuestión. Afrontando estos retos y echando mano de metodologías como la optimización se puede contemplar un desarrollo global que beneficie la supervivencia y desarrollo de la industria (Zhang *et al.*, 2014).

Tradicionalmente, la responsabilidad de garantizar la sostenibilidad recae en las unidades organizativas individuales de una compañía, las cuales tratan de optimizar su rendimiento sólo en su propio ámbito de competencia. Sin embargo, éste enfoque a menudo conduce a decisiones que son óptimas para una unidad individual, pero sub-óptima para todo el sistema. Por lo tanto, un

desafío clave es tomar un enfoque holístico por esencia, en el cual optimice la cadena de suministro que incluya todas las etapas, desde la adquisición de la producción hasta la distribución, en un marco único. Es decir, “sustentabilidad significa llevar a cabo cada decisión teniendo siempre en mente el futuro”.

1.1.3. Integración de procesos

Los ahorros de agua y energía, el calentamiento global, y las emisiones de gases de efecto invernadero se han convertido en temas importantes desde los puntos de vista tecnológico, social y político. La razón de que sobre estos temas recaiga tanta importancia es por su estrecha relación al suministro de energía, en los últimos años varios trabajos han sido encaminados a mejorar de eficiencia energética mientras se da una reducción de emisiones, compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes. En respuesta a los requerimientos sociales, desde 1970 se han reportado metodologías relacionadas con la integración y acoplamiento de procesos basados en la reducción de servicios externos de calentamiento, lo cual suele ir acompañado de una reducción equivalente de la demanda de servicios de enfriamiento, y por consecuente a la reducción de emisiones de CO₂ (Klemes, 2011).

La integración de procesos es un conjunto de metodologías para combinar varios procesos y con ello reducir el consumo de recursos y reducir las emisiones nocivas. Su aplicación inicio como integración de calor (HI, por sus siglas en inglés “Heat integration”), estimulada por la crisis energética de la década de 1970.

1.1.4. Optimización

La optimización es parte de la vida, tanto que en la naturaleza lo podemos ver reflejada. Por ejemplo, los animales de climas fríos tienen extremidades más pequeñas que los animales que viven en clima cálido para proporcionar una superficie mínima en relación al volumen y así tengan mínimas pérdidas de calor. Se dice que en nuestra vida cotidiana está llena de decisiones en las que se tiene como objetivo la minimización o maximización de algún objetivo particular; por ejemplo, elegir la casa que proporcione mayor seguridad. Sin embargo, los sistemas se vuelven más complejos cuando se tiene mayor número de decisiones simultaneas (ver por ejemplo la Figura 1.2), algunas de ellas limitadas, lo cual nos lleva al uso de teorías de optimización matemática que con la ayuda de sistemas computacionales podemos tener la elección más factible dentro de un conjunto de soluciones alternativas (Diwekar, 2008).

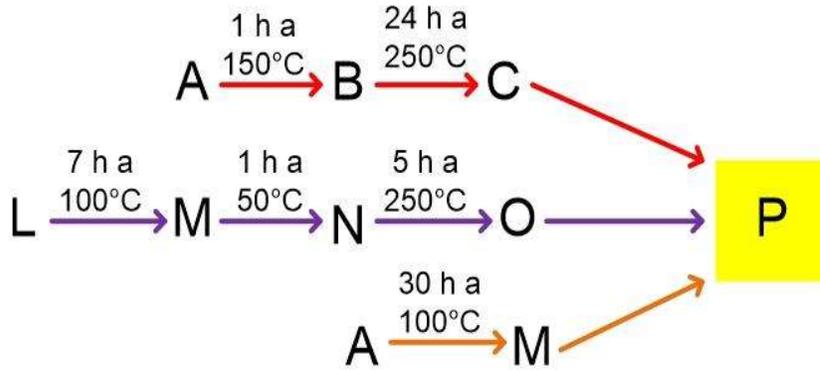


Figura 1.2 Diferentes opciones para obtener un producto bajo distintas condiciones

Las teorías de optimización se puede aplicar a diferentes tareas como lo son: un nuevo diseño del sistema, la síntesis de una nueva red de procesamiento, y el diseño de adaptación y mejoras operativas en intercambiadores de calor, reactores, y redes de separación. La optimización se emplea para encontrar la mejor opción disponible. Una función objetivo consiste en un criterio de desempeño para ser maximizada o minimizada. Las propiedades del sistema que determinan esta función son de dos tipos (Klemes, 2011):

1. Parámetros.- Un conjunto de características que no varían con respecto a la decisión que debe tomarse.
2. Variables.- Un conjunto de características que se permite que varíen.

1.1.4.1. GAMS

El sistema de modelado algebraico general (conocido en inglés como GAMS) es un software que está diseñado específicamente para modelar problemas de optimización. El sistema es especialmente útil con problemas complejos y grandes. GAMS está disponible para su uso en computadoras personales, estaciones de trabajo, mainframes y supercomputadoras. GAMS permite al usuario concentrarse en el problema de modelado, haciendo la instalación simple. El sistema se encarga de los detalles que requieren mucho tiempo de la máquina y el sistema de aplicación de software específico.

1.1.4.2. Características del sistema

El software GAMS permite al usuario concentrarse en el modelado, al eliminar la necesidad de pensar en los problemas puramente técnicos específicos de la máquina, tales como

cálculos de direcciones, tareas de almacenamiento, la vinculación de subrutinas de entrada-salida y el control de flujo, lo cual aumenta el tiempo disponible para conceptualizar y ejecutar el modelo, así como el análisis de los resultados. El lenguaje GAMS es formalmente similar a los lenguajes de programación de uso general. Por lo tanto, es familiar para cualquier persona con experiencia en programación. Utilizando GAMS, los datos se introducen una sola vez en la lista de parámetros y forma de tabla. Los modelos se describen en declaraciones algebraicas concisas que son fáciles de leer para los seres humanos y las máquinas. De esta manera, juegos completos de restricciones estrechamente relacionadas se introducen en una sentencia. GAMS genera automáticamente cada ecuación de restricción, y permite al usuario hacer excepciones en los casos en que no se desea la generalidad. Las declaraciones de los modelos pueden ser reutilizados sin tener que cambiar el álgebra cuando surgen otras instancias de los mismos o de otros problemas conexos. La ubicación y el tipo de errores se identifican antes de que se tenga una solución. GAMS maneja modelos dinámicos que implican secuencias de tiempo, retrasos y clientes potenciales y el tratamiento de los extremos temporales. Los modelos pueden ser desarrollados y documentados de forma simultánea porque GAMS permite al usuario incluir un texto explicativo, como parte de la definición de cualquier símbolo o ecuación. (Broke *et al.*, 2014).

1.1.4.3. Tipos de modelos soportados

Los tipos de modelo que incluye GAMS son del tipo lineal (LP), mixto entero lineal (MIP), mixto entero no lineal (MINLP), y las diferentes formas de problemas no lineales (NLP), y puede soportar los siguientes tipos de modelos básicos:

- ✓ LP Programación lineal.
- ✓ MIP Programación entera mixta.
- ✓ NLP Programación no lineal.
- ✓ MCP Problemas complementarios mixtos.
- ✓ MPEC Programas matemáticos con restricciones de equilibrio.
- ✓ CNS Sistemas restringidos no lineales.
- ✓ DNLP Programación no lineal con derivadas discontinuas.
- ✓ MINLP Programación con mezcla de integración y no lineal.
- ✓ QCP Programación cuadrática restringida.

-
- ✓ MIQCP Programas con restricciones de mezcla de integración cuadrática.

1.2. ANTECEDENTES

Grossman (2004) plasmó una visión financiera de los procesos industriales para esa época, en la que se incluyó el papel del ingeniero químico en los Estados Unidos, argumentando que para dar soporte al valor de preservación y de crecimiento a los sistemas de procesos ingenieriles se tenían que contemplar tres retos principales: el descubrimiento y diseño de nuevos productos, la optimización de las cadenas de suministro y la evaluación del ciclo de vida. Papageorgiou (2009) por su parte realizó una investigación en la cual rescata que las decisiones a tomar en cadenas de suministro depende del nivel estratégico, táctico y operativo en el cual se pueden tomar estas decisiones, así como el tamaño, número y ubicación de los lugares de fabricación, almacenes y centros de distribución y los recursos dentro de ellos. Así mismo, en las cadenas de suministro son importantes las decisiones de producción relacionados con la planificación y programación de la producción, la conectividad de red (asignación de proveedores a las plantas, almacenes y mercados), gestión de los niveles de inventario y políticas de reposición y toma de decisiones sobre medios de transporte, tamaño y envíos de materiales. Bajo este rubro se tiene que Pekala *et al.* (2009) realizaron un estudio en el cual se consideró la ruta de producción, incluyendo la obtención, entrega y conversión a bioetanol de las materias primas y la distribución del bioetanol al consumidor, desarrollando un modelo matemático que integra espacialidad y variación de las instalaciones, tiempo de demandas y una planificación estratégica de los futuros sistemas de la cadena de suministro de bioetanol. Otros trabajos encaminados al análisis de cadenas de suministro son la producción de calor a partir de biomasa como el reportado por Dune *et al.* (2007), en el que se tomaron en cuenta las actividades de recolección, secado, almacenamiento y transporte de biomasa, lo que influye en rendimientos, contenido de humedad, velocidad de secado y demanda estacional. Algunos otros factores importantes a tomar en cuenta son los relacionados con el impacto de la dinámica de la demanda en nuevos productos como en el caso reportado por Amini y Li (2011), en el cual se desarrolló un modelo híbrido que determina al mismo tiempo la producción óptima/plan de ventas y la configuración de la cadena de suministro. La producción y el plan de ventas proporcionan decisiones sobre el momento

óptimo para lanzar un nuevo producto, así como la producción y la cantidad de las ventas en cada período de planificación.

Marvin *et al.* (2012) reportaron modelo en el que involucra la selección de tecnologías para la producción de bioetanol a partir de cinco tipos de residuos agrícolas, proponiendo un pre-tratamiento ácido y una hidrólisis enzimática, buscando óptimos sobre las capacidades de biorefinerías y distribución de sitios de cultivo. Uno de los aspectos que siempre deben de ser considerados en una optimización según Cucek *et al.* (2012) tiene que ver para el caso de producción y disminuir el impacto ambiental relacionado al proceso así como maximizar el rendimiento económico. Bamufleh *et al.* (2013) propusieron el análisis de la cadena de suministro para un proceso de cogeneración, con el objetivo de explotar los aspectos positivos que combinan el calor y energía industrial, evaluando no sólo aspecto económico como se había venido manejando años atrás, en esta presentación se agregó el impacto social y ambiental.

Algunos otros autores engloban factores de incertidumbre en las cadenas de suministro así como la evaluación multi-periodo, como lo realizaron Rodriguez *et al.* (2014) para el caso de evaluar el diseño completo de nuevas plantas y sus almacenes a partir plantas actuales, esto con el objetivo de evaluar que parte de las actuales no son redituables y con ello considerar la eliminación de estos, contemplando la instalación de plantas más completas. You y Yue (2014) propusieron modelos mixtos enteros no lineales para el diseño óptimo, planificación e integración entre varias empresas con el objetivo de la producción de biocombustibles a partir de sus residuos manejando un equilibrio en el mercado.

Todos los trabajos hasta ahora existente, pueden ser herramientas primero para evaluar los la cadena de suministro de producción de *Ambrox*® a partir de *Ajeratina jocotepecana*, evaluando el impacto ambiental, social y económico; siendo una alternativa nueva para la producción de un compuesto indispensable en la producción de perfumes. Por otro lado el análisis de reconfiguración de la industria azucarera en la que se integren los subproductos con alto nivel energético, mejorando el sector azucarero y beneficiando a los productores, sin olvidar el hacer del proceso un proceso ambientalmente amigable.

1.3. HIPÓTESIS

El uso de la optimización en las cadenas de suministro asociada a la producción de *Ambrox*® y bioetanol resultará ser una herramienta que permita beneficios sustentables a

diversas regiones del estado de Michoacán (económicos y sociales), impulsando además a su integración con otros procesos favoreciendo el desarrollo del país.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. General

Realizar una planeación óptima de la cadena de suministro en la producción de **Ambrox®** a partir de *Ageratina jocosotepecana* y de la integración de producción de bioetanol al proceso de obtención de azúcar.

1.4.2. Particulares:

- Proponer un modelo de optimización para las cadenas de suministro del **Ambrox®** producido a partir de la planta *Ageratina jocosotepecana*, contemplando la utilización de la biomasa generada por el proceso para la producción de bioetanol.
- Adaptar las metodologías propuestas para la integración de producción de bioetanol al proceso de elaboración de azúcar, así como llevar a cabo el análisis de dichas metodologías a diferentes escenarios.
- Aplicar el modelo de optimización considerando diversos escenarios propuestos para el caso de estudio e involucrando diversos factores económicos (costos de producción y ventas), ambientales (ciclo de vida de la producción de **Ambrox®**) y sociales (generación de empleos a lo largo de toda la cadena de producción).
- Realizar una planeación óptima de la cadena de suministro de producción de bioetanol a partir de la biomasa obtenida de la producción de **Ambrox®**.
- Construir una superestructura, tanto para la producción de **Ambrox®** como para la integración de la biorefinería al proceso de producción de azúcar en la cual se contemplen aspectos como rutas de proceso (distancias y ubicación entre planta-planta y planta-cultivo) y las necesidades de los cultivos (suelo, clima).
- Establecer los municipios que pueden ser candidatos en el estado de Michoacán para la producción de la *Ageratina jocosotepecana*, así como analizar el impacto que se tendría al llevar a cabo esta actividad. (en base a resultados que se arrojen del estudio sobre necesidades de cultivo y desarrollo de la *Ageratina jocosotepecana*).
- Hacer una perspectiva del mercado que se puede abarcar con la producción de **Ambrox®** y bioetanol.

1.5. METODOLOGÍA

Para resolver la problemática planteada, se propone la siguiente metodología en la que se involucra los pasos enlistados (ver Figura 1.3).

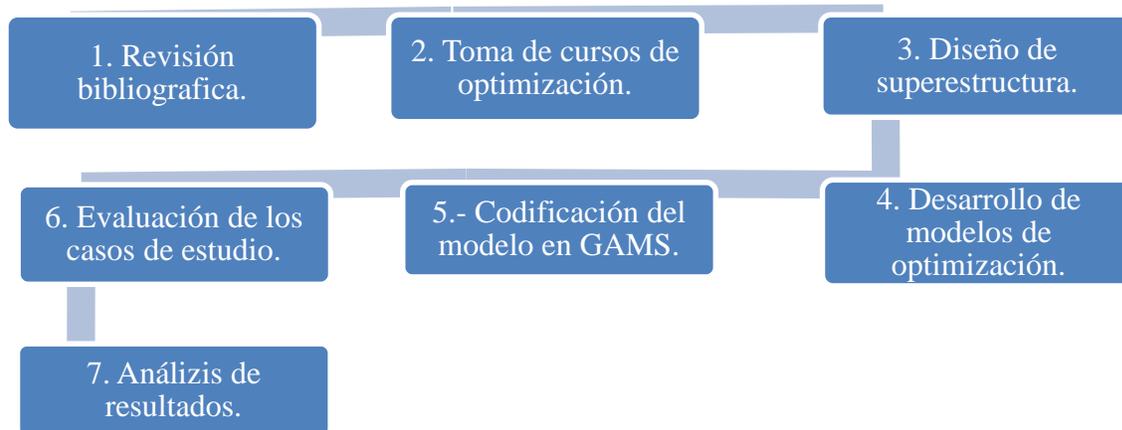


Figura 1.3 Diagrama de la metodología.

1. Se realizó una extensa revisión bibliográfica, la cual incluye información respecto del **Ambrox®**, la optimización de cadenas de suministro así como la planeación y optimización de biorefinerías, para atender desde aspectos generales (“*Big picture*”), hasta aspectos específicos, y así determinar los factores que incluyen las cadenas de suministro para una optimización (El-Halwagi, 2012).

2. Se tomaron cursos de optimización con el objeto de aprender a identificar los tipos de problemas, como se pueden resolver (Metodologías computadas), y la toma de decisiones sobre una buena optimización.

3. Se planteó una superestructura para la cadena de suministro de la producción de **Ambrox®** a partir de **Ageratina jocotepecana**, así como para la integración de la biorefinería en la elaboración de azúcar. Nótese que este tipo de cadenas de suministro representan una característica especial, ya que a diferencia de otros procesos estos son pequeñas cantidades de producto que representan un alto valor agregado

4. En base a la superestructura generada se procedió a desarrollar un modelo de optimización para la cadena de suministro del **Ambrox®** a partir de **Ageratina jocotepecana**,

además de contemplar la cadena optimización en la cadena de suministro de su principal subproducto bioetanol.

5. Posteriormente se procedió a codificar el modelo en el software GAMS.

6. Una vez que el código fue depurado, se procedió a analizar el caso estudio con diferentes escenarios. Estos resultados permitirán evaluar, técnica, económica, ambiental y socialmente para cada cadena de suministro.

7.- Finalmente, se procedió a reportar los resultados obtenidos así como a la escritura y defensa de la tesis.

Capítulo 2

2. PLANEACIÓN ÓPTIMA DE LA CADENA DE SUMINISTRO EN LA PRODUCCIÓN DE *AMBROX*®

2.1. PANORAMA GENERAL

Los olores existen en la naturaleza desde antes de que el hombre apareciera. Sin embargo, ha sido objetivo de estudio su manipulación a través de los perfumes y productos asociados al aseo personal, dando paso a enormes industrias. En este contexto, para finales del 2006 las importaciones de perfumes alcanzaron US\$9,062 miles de millones de dólares a nivel mundial, mientras que las exportaciones para el mismo año fueron de US\$10,450 millones de dólares (CBI Market Information Database, 2009). La composición general de los perfumes es una parte de esencia y 9 partes de fijador (Winegar *et al.*, 2009). En este contexto, el ámbar gris se utiliza como fijador en perfumería fina, éste se produce en el intestino del cachalote; sin embargo, la única manera de obtenerlo de forma natural es mediante el sacrificio, colocando a la especie en peligro de extinción, por lo que se ha llegado a la prohibición de esta actividad, lo que abre paso a la necesidad de la síntesis de nuevos sustitutos como el (-)-8 α ,12-epoxi-13,14,15,16-tetranorlabdano conocido como *Ambrox*®. Uno de los productos comerciales más importantes sintetizado por primera vez en 1950 por Stoll y Hinder (Nunes *et al.*, 1996).

Hoy en día son muchos los trabajos de síntesis realizados para la obtención de nuevas rutas para la obtención de *Ambrox*®, en las que normalmente se parte de productos de naturaleza diterpénica; el más ampliamente usado es el llamado esclareol, un diterpeno labdánico aislado por primera vez de *Salvia sclarea* (Fráter *et al.*, 1998). Aunque son varios los métodos de síntesis reportados a partir del esclareol, todos tienen grandes desventajas como un alto consumo de reactivos, lo que se traduce en un alto costo, además del riesgo de toxicidad para quien realice el procedimiento y el largo tiempo invertido para la obtención del producto ya que estas síntesis regularmente involucran una amplia serie de reacciones en su desarrollo, dado esto se ha continuado con la búsqueda de productos más sustentables que puedan satisfacer las demandas de *Ambrox*® sintético.

2.2. *AMBROX*® SINTÉTICO

El compuesto químico ámbar más importante es el éter tricíclico (*Ambrox*®). La síntesis de este compuesto es fundamental para la creación de fragancias; sin embargo, el precio de este

compuesto va de los 800 a los 1000 dólares por kg, y su consumo a nivel mundial es de 15-25 toneladas por año (Fráter *et al.*, 1998; Steenkamp, 2010). La síntesis comercialmente más común es partir del diterpeno escareol, esta síntesis es relativamente barata ya que va de los 150-200 dólares por kg, y es obtenido a partir del aceite de Salvia (*Salvia Sclarea L.*) (Fráter *et al.*, 1998). Cabe mencionar que el proceso químico es llevado a cabo en un tiempo estimado de 8 días y 22 horas, y tiene grandes riesgos llevar a cabo el proceso (Steenkamp, 2010). Por otro lado, investigaciones recientes llevadas a cabo por el grupo de investigación encabezado por la Dra. Rosal Elva Norma del Rio Torres del Instituto de Investigaciones Químico biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo han encontrado que de la planta *Ageratina jocotepecana* (Endémica del estado de Michoacán) es posible llevar a cabo la producción de *Ambrox*® sintético a partir de algunos compuestos encontrados en dicha planta (Gutiérrez *et al.*, 2012).

2.2.3. *Ageratina jocotepecana*

Las plantas incluidas en el género *Ageratina* van desde hierbas hasta árboles que tienen hojas simples, generalmente opuestas, de márgenes enteros o dentados, y superficies con o sin pubescencia (i.e., especie de pelos para evitar la deshidratación o evitar quemaduras por bajas temperaturas). Las características particulares de esta especie incluyen pecíolos de 3 a 6 cm de largo, hojas deltoides subcordadas, palmeadas y nervadas cerca de la base, márgenes dentados irregulares, de 5 a 10 cabezas bracteadas dispuestas



Figura 2.2 *Ageratina jocotepecana*

en racimos axilares, 50-80 flores por cabeza, corolas blancas de 5-6 mm de largo y aquenios cilíndricos de 4 mm de largo (ver Figura 2.4). La *Ageratina jocotepecana* fue identificada taxonómicamente por el D.C. J. Rzedowski, conservando un ejemplar en el herbario del Instituto de Ecología Pátzcuaro A.C. y otro en el Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

2.2.4. Síntesis de Ambrox® a partir de Ageratina jocotepecana

La experimentación realizada por Gutiérrez *et al.* (2012) en el Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de la UMSNH para la síntesis de **Ambrox®** a partir de *Ageratina jocotepecana* es resumida en la Figura 2.5 (Gutiérrez *et al* 2012).

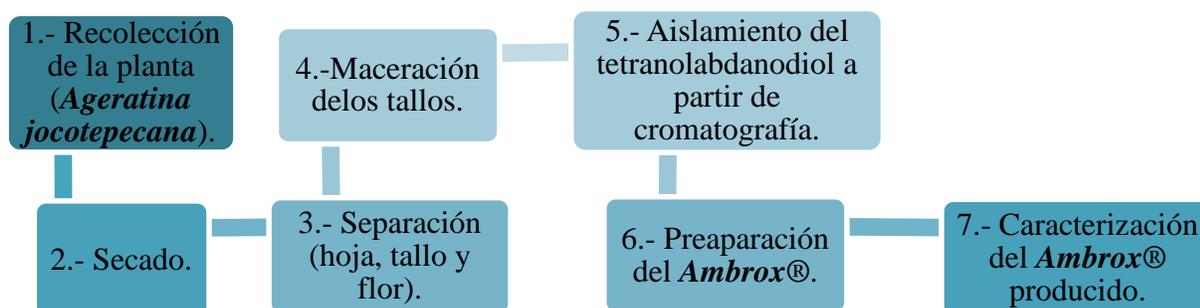


Figura 2.5 Diagrama de flujo para la obtención de **Ambrox®** a partir de *Ageratina jocotepecana* a nivel laboratorio

2.2.5. Principales resultados

Una vez identificada taxonómicamente la planta como *Ageratina jocotepecana*, 320 g de tallos se maceraron con hexano y el extracto fue re-suspendido en metanol para eliminar grasas. A partir de este peso inicial, fue posible obtener 20 g de extracto total, lo que corresponde a un 6% de rendimiento respecto del peso total inicial de tallos. Posteriormente, 2 g del mismo fueron sometidos a una separación mediante cromatografía en columna usando como disolventes mezclas de hexano y acetato de etilo en orden ascendente de polaridad. Una vez realizada la cromatografía y evaporado el disolvente de cada una de las fracciones, se enviaron a resonancia magnética nuclear aquellas en las cuales se observaron residuos de muestras, de las fracciones eludidas con una polaridad 1:1 se obtuvieron 100 mg (5%) del compuesto caracterizado como tetranolabdanodiol por comparación de sus datos espectroscópicos con los de la literatura.

2.3. PROBLEMÁTICA A RESOLVER

Los perfumes no son nuevos, su formulación se remonta a tiempos ancestrales al encontrarse que ciertos olores podían ahuyentar a algunos depredadores; sin embargo, hoy en día el tiempo de residencia de los aromas para la industria de la perfumería ha sido una problemática de gran importancia a resolver, teniendo que el producto conocido como Ámbar Gris (*Ambrox*®) ha cumplido con esta meta no solo al hacer que el aroma persista por mucho tiempo sino que además se vuelve parte del tono final de cada perfume, convirtiéndose esto la parte más importante y de mayor renombre para diferentes marcas de la industria de la perfumería. Sin embargo, al ser un producto obtenido de la matanza de cachalote, lo vuelve un proceso alarmante para esta especie en peligro de extinción, y es donde se toma la idea de buscar nuevas alternativas que muestren una salida a este problema. Se ha demostrado que la ruta que presenta el mayor rendimiento y los menores costos es la producción de *Ambrox*® a partir de un extracto obtenido de *Ageratina jocotepecana* en un solo paso químico, esto conlleva a realizar un estudio de la cadena de suministro que no sólo se base en costos y rendimientos sino que también contemple el desarrollo para los posibles municipios en el estado de Michoacán donde se plantee llevar a cabo esta actividad.

2.4. ESTRATEGIA USADA PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA

2.4.1. *Diseño de la superestructura*

Analizar los cambios, tanto benéficos como perjudiciales, que se tendrán en el ámbito social, económico y ambiental debido a la producción de esta planta para satisfacer cierta demanda del mercado es la tarea primordial del presente proyecto. También, se deben contemplar las rutas de cultivo-pre-tratamiento-proceso-mercado, para lo cual se deben contemplar las distancias y mejores sitios de disposición de la materia prima. Esto se ve reflejado en las superestructuras mostradas en las Figuras 2.6 y 2.7.

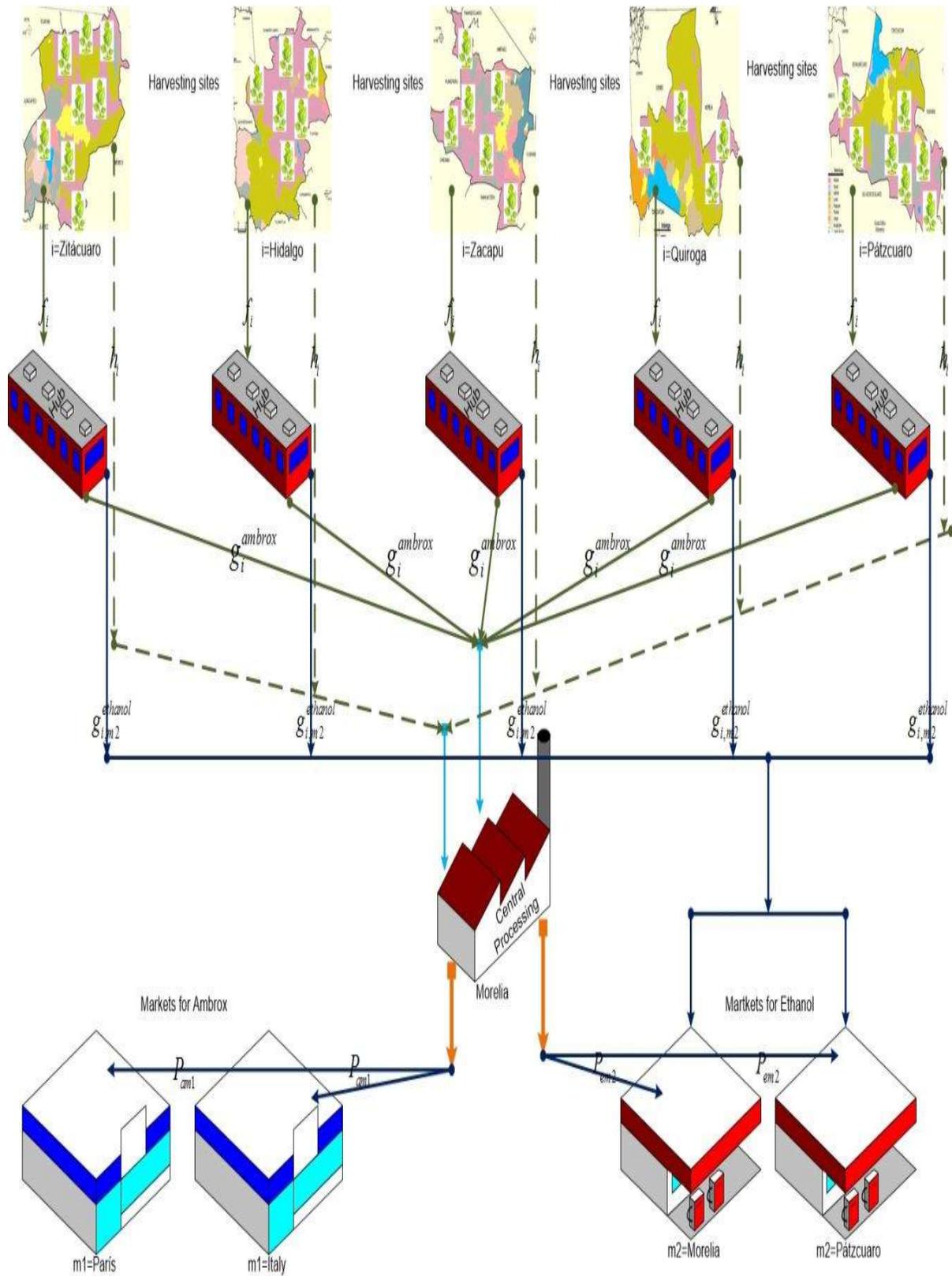


Figura 2.6 Superestructura de la cadena de suministro en la producción de *Ambrox*[®], contemplando tipo de suelo

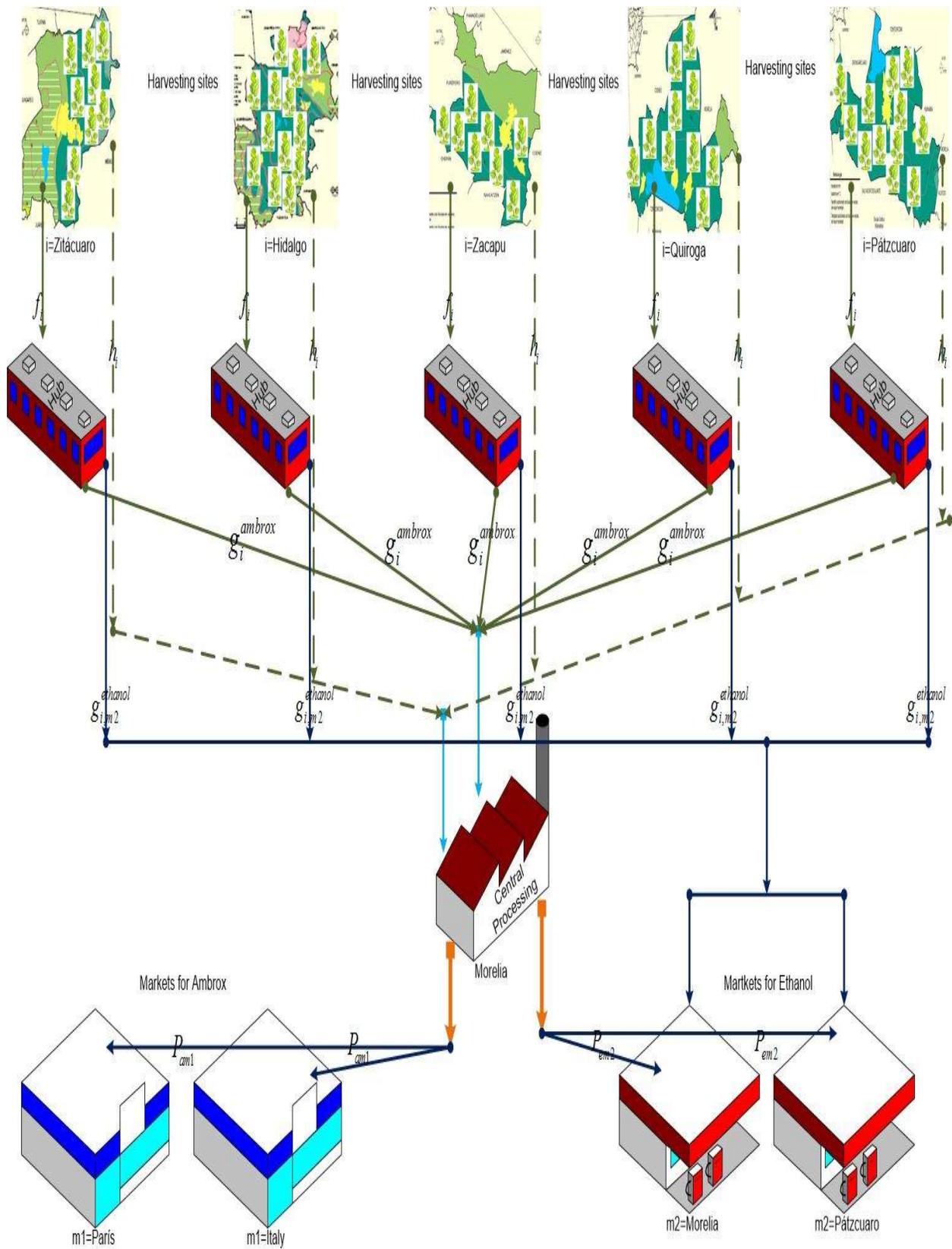


Figura 2.7 Superestructura de la cadena de suministro en la producción de **Ambrox®**, contemplando tipo de clima

Se realizaron dos superestructuras contemplando dos aspectos importantes para el cultivo y desarrollo de la *Ageratina jocotepecana*, el primero es el tipo de suelo (ver la Figura 2.6), y el segundo es el tipo de clima (ver la Figura 2.7), la razón de ello es que la información relacionada con cuál de las dos características tiene mejor efecto benéfico en el desarrollo de la planta se está llevando actualmente a cabo en campo. Podemos observar que comparando las superestructuras debido a la ubicación tanto de tipo de suelo y clima predominante en los sitios de cultivo, varían debido a la geografía de cada municipio seleccionado.

2.5. MODELO MATEMÁTICO

❖ Uso de área:

El área necesaria para los cultivos de *Ageratina jocotepecana* (A_i), será igual a la cantidad de área disponible ($A_i^{existing}$), y la cantidad de área que cumpla con las características necesarias para los cultivos (A_i^{new}) a través de la Ecuación (1).

$$A_i = A_i^{existing} + A_i^{new}, \forall i \in I \quad (\text{Ecuación. 1})$$

El límite para el uso de área lo describe la Ecuación (2); la cual indica que la cantidad de superficie necesaria para los cultivos (A_i) debe ser menor o igual a la cantidad de superficie existente (A_i^{max}).

$$A_i \leq A_i^{max}, \forall i \in I \quad (\text{Ecuación. 2})$$

❖ Balances para los sitios de cultivo:

$$F_i = \alpha_i A_i \quad \forall i \in I \quad (\text{Ecuación. 3})$$

En la Ecuación (3), F_i representa la cantidad de “*Ageratina jocotepecana*” producida en cada uno de los municipios seleccionados, la cual está dada en base al porcentaje de tallo (α_i) en ($Kg / m^2 \text{ año}$) producido por metro cuadrado de área (A_i) cultivada.

$$F_i \geq f_i + h_i \quad \forall i \in I \quad (\text{Ecuación. 4})$$

$$F_{central} = \sum_i h_i \quad (\text{Ecuación. 5})$$

La Ecuación (4) indica que el flujo de *Ageratina jocotepecana* F_i debe ser mayor o igual a la suma de flujo de tallos enviados a las plantas de pre-procesamiento f_i y al flujo de tallos enviado directamente a la central de procesamiento h_i , mientras que la Ecuación (5) representa la suma de tallo enviado a la unidad central en caso de que ésta exista o no.

❖ Balance general de las plantas de pre-procesamiento.

En este balance es necesario contemplar tanto la producción de nuestro principal compuesto de importancia que es el **Ambrox**[®] (g_i^{ambrox}), y un subproducto que debido a la cantidad de materia lignocelulósica producida se hace interesante analizar, siendo este la producción de bioetanol ($g_i^{ethanol}$). La Ecuación (6) define que el flujo de producción de **Ambrox**[®] (g_i^{ambrox}) depende del flujo de tallo (f_i) procesado multiplicado por el factor de conversión (β_i^{ambrox}) de tallo a producto. Mientras que la Ecuación (7) describe la producción de bioetanol ($g_i^{ethanol}$) tomando en cuenta los mismos parámetros, siendo el factor de conversión ($\beta_i^{ethanol}$) diferente para este producto a partir del flujo de alimentación de tallo (f_i).

$$g_i^{ambrox} = f_i \beta_i^{ambrox}, \quad \forall i \in I \quad (\text{Ecuación. 6})$$

$$g_i^{ethanol} = f_i \beta_i^{ethanol}, \quad \forall i \in I \quad (\text{Ecuación. 7})$$

❖ Balances para la planta central de procesamiento:

La existencia de la planta central determina costos de capital de ésta, y también costos que se generan por el transporte de materia prima entre los sitios de cultivo y la planta central. Contemplando la existencia de ésta se realiza un balance de la producción en esta unidad, las cual está indicada por la Ecuación (8) para el caso del **Ambrox**[®] y para el bioetanol la Ecuación (9). Para obtener la producción de **Ambrox**[®] y bioetanol, los flujos enviados de tallo a la unidad central ($F_{central}$) se multiplican por un factor de transformación (γ^{ambrox}) y ($\gamma^{ethanol}$) respectivamente; aunado a la producción que se tiene en cada una de las plantas de pre-procesamiento; puesto a que ésta además de funcionar como planta de transformación puede

funcionar de igual manera como almacén, por lo que las Ecuaciones (10) y (11) describen la producción en la unidad central y representan los balances para la producción total de **Ambrox**® y bioetanol, respectivamente.

$$P^{ambrox} = F_{central} \gamma^{ambrox} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

$$P^{ethanol} = F_{central} \gamma^{ethanol} \quad (\text{Ecuación. 9})$$

$$M^{ambrox} = P^{ambrox} + \sum_i g_i^{ambrox} \quad (\text{Ecuación. 10})$$

$$M^{ethanol} = P^{ethanol} + \sum_i g_i^{ethanol} \quad (\text{Ecuación. 11})$$

La Ecuación (12) indica que la producción total de **Ambrox**® debe ser igual a las ventas que se tengan en el mercado, con el objeto de no tener una producción extra de la demandada por el mercado, para el caso de la producción de bioetanol se tiene la Ecuación (13) que indica los mismo.

$$M^{ambrox} = \sum_{m1} S_{m1}^{ambrox} \quad (\text{Ecuación. 12})$$

$$M^{ethanol} = \sum_{m2} S_{m2}^{ethanol} \quad (\text{Ecuación. 13})$$

❖ Balances en los mercados:

El flujo de demanda máxima de los mercados ($P_{m1}^{\max ambrox}$) debe ser mayor o igual a la demanda que se cubre con el flujo de **Ambrox**® producido (P_{m1}^{ambrox}), lo cual es modelado a través de la Ecuación (14).

$$P_{m1}^{ambrox} \leq P_{m1}^{\max ambrox}, \quad \forall m1 \in M1 \quad (\text{Ecuación. 14})$$

Como límite se tiene que la demanda máxima de los mercados para el bioetanol ($P_{m2}^{\max ethanol}$) debe ser mayor o igual a la demanda que se cubre con el total de bioetanol producido ($M_{m2}^{ethanol}$), lo cual es modelado con la Ecuación (15).

$$P_{m2}^{ethanol} \leq P_{m2}^{\max ethanol} \quad \forall m2 \in M2 \quad (\text{Ecuación. 15})$$

❖ Generación de empleos:

La cantidad de empleos generados (N_{jobs}) se describe la Ecuación (16), en la cual se establece el número de empleos en cada una de las etapas de la cadena de suministro; los empleos generados en los sitios de cultivo ($\sum_i n_{ij}^{harves}$), los empleos generados en la ruta del cultivo en la planta de pre-procesamiento ($\sum_i n_{ij}^{process}$), y los empleos de la ruta de los sitios de cultivo a la planta de central de procesamiento ($\sum_i n_i^{process}$), así como los empleos generados en la transformación de **Ambrox**® en la planta central ($\sum_i n_{ij}^{transambrox}$), los empleos que se generan por el proceso de producción de bioetanol ($\sum_{m2} \sum_i n_{ji,m2}^{transethanol}$), se consideran también los empleos generados por el transporte de materia prima y productos como, los cuales incluyen los empleos generados por el transporte de plantas a la unidad central de procesamiento ($\sum_{ji} n_{ji}^{transportplant}$), los empleos generados en las rutas de transporte de **Ambrox**® a los mercados ($\sum_{m1} n_{jm1}^{transportambrox}$), y los empleos generados por el transporte de bioetanol a los mercados ($\sum_{m2} n_{jm2}^{transportethanol}$).

$$N_{jobs} = \sum_i n_i^{harves} F + \sum_i n_i^{process} f_i + \sum_i n_i^{process} h_i + \sum_i n_i^{transambrox} + g_i^{ambrox} \sum_{m2} \sum_i n_{ji,m2}^{transethanol} g_{i,m2}^{ethanol} + \sum_i n_i^{transportplant} h_i + \sum_{m1} n_{m1}^{transportambrox} P_{m1}^{ambrox} + \sum_{m2} P_{m2}^{ethanol} n_{m2}^{transportethanol}$$

(Ecuación. 16)

❖ Costos totales:

Los costos ($Cost$) se evalúan con la Ecuación (17), la cual involucra los costos relacionados con los cultivos (siembra, desarrollo de la planta, corte de la planta) ($\sum_i C_i^{harvest}$), el costo de capital involucrado en el proceso de síntesis de **Ambrox**® y bioetanol en las plantas de pre-procesamiento (costos variables y costos fijos) ($C_{prepropla,i,p}^{capprocess}$), el costo de capital del proceso de transformación de **Ambrox**® y bioetanol en la unidad central $C_{central,p}^{capprocess}$, los costos que se

involucran en el transporte del **Ambrox**[®] ($\sum_i C_i^{trans-ambrox}$) y bioetanol ($\sum_{m2} \sum_i C_{im2}^{trans-ethanol}$) producidos en las unidades de pre-procesamiento, esta ecuación también involucra el costo relacionado con el transporte de materias primas ($\sum_i C_i^{trans-plant}$) y del transporte de productos a los diferentes mercados ($\sum_{m1} C_{m1}^{trans-ambrox}$) y ($\sum_{m2} C_{m2}^{trans-ethanol}$):

$$Cost = \sum_i C_i^{harvest} F_i + C_{central,p}^{capprocess} + C_{prepropla,i,p}^{capprocess} + \sum_i C_i^{trans-plant} h_i + \sum_{m1} C_{m1}^{transp-ambrox} P_{m1}^{ambrox} + \sum_{m2} P_{m2}^{ethanol} C_{m2}^{trans-ethanol} \quad (\text{Ecuación. 17})$$

La Ecuación (17) muestra el costo total que se genera por llevar a cabo toda la cadena de suministro; sin embargo, una parte importante son los costos de capital que se generan por llevar a cabo el procesamiento en las plantas industriales, ya sean de pre-procesamiento o central. La decisión entre elegir una y otra está directamente asociada a la capacidad, ubicación y número de plantas elegidas a partir de la demanda de los mercados; la manera de estimar estos costos está dada por la existencia o no de cada tipo de planta, para ello se formularon dos disyunciones, una con el objetivo de establecer la existencia y características (capacidad instalada) de las plantas de pre-procesamiento y la segunda aplicable para la unidad central. A continuación se presenta la primera disyunción:

$$\forall_p \left[\begin{array}{l} Y_{p,i} \\ F_{Aj,i,p}^{lower} \leq F_{Aj,i} \leq F_{Aj,i,p}^{upper} \\ C_{prepropla,i,p}^{capprocess} = C_{i,p}^F + C_{i,p}^V F_{Aj,i} \end{array} \right], \quad \forall i \in I$$

Si la variable booleana es verdadera, entonces se seleccionará una capacidad dada en base a la cantidad de materia prima disponible con lo que se añadirá a los costos correspondientes. La disyunción es reformulada como un conjunto de ecuaciones algebraicas de la siguiente manera. En primer lugar, sólo una sección debe ser seleccionado (la primera sección corresponde a una capacidad de cero y los costos unitarios son iguales a cero):

$$\sum_p y_{p,i} = 1, \quad \forall i \quad (\text{Ecuación. 18})$$

Posteriormente, las variables continuas (Flujo de materia prima (Ecuación 19) y costos asociados al procesamiento (Ecuación 20)] tiene que ser desagregadas de la siguiente manera:

$$F_{Aj,i} = \sum_p DF_{Aj,i,p}, \quad \forall i \quad (\text{Ecuación. 19})$$

$$C_i^{Cap} = \sum_p DC_{i,p}^{Cap}, \quad \forall i \quad (\text{Ecuación. 20})$$

A partir de las expresiones anteriores, las relaciones se pueden expresar en términos de las variables desagregadas, como se observa en las Ecuaciones (21) y (22):

$$y_{p,i} F_{Aj,i,p}^{\text{lower}} \leq DF_{Aj,i,p} \leq y_{p,i} F_{Aj,i,p}^{\text{upper}}, \quad \forall p, \forall i \quad (\text{Ecuación. 21})$$

$$C_{prepropla,i,p}^{capprocess} = C_{i,p}^F y_{p,i} + C_{i,p}^V F_{Aj,i}, \quad \forall p, \forall i \quad (\text{Ecuación. 22})$$

De manera similar se formuló la disyunción para el caso de la planta central, en la cual se evalúa la capacidad instalada de ésta, el objetivo de contar con una planta central además de producir es tener un punto de conexión con los mercados, ya que para este caso la ubicación de la planta central no es una variable. Se propone por ende que esta se ubique en la ciudad de Morelia debido a la distancia que existe entre los sitios de cultivo (y los costos asociados al transporte) y las diferentes rutas con las que se cuenta para transportar al **Ambrox**® al mercado Europeo; para ellos se propuso la siguiente disyunción:

$$\forall_p \left[\begin{array}{c} Y_p \\ F_{Aj,central,p}^{\text{lower}} \leq F_{central} \leq F_{Aj,central,p}^{\text{upper}} \\ C_{central,p}^{capprocess} = C_{cen,p}^F + C_{cen,p}^V F_{central} \end{array} \right]$$

Posteriormente, la disyunción se reformula de nuevo como un conjunto de restricciones algebraicas:

$$\sum_p y_{cen,p} = 1 \quad (\text{Ecuación. 23})$$

$$F_{central} = \sum_p DF_{Aj,central,p} \quad (\text{Ecuación. 24})$$

$$C_{cen}^{Cap} = \sum_p DC_{cen,p}^{Cap} \quad (\text{Ecuación. 25})$$

$$y_{cen,p} F_{Aj,central,p}^{\text{lower}} \leq DF_{Aj,central,p} \leq y_{cen,p} F_{Aj,central,p}^{\text{upper}}, \quad \forall p \quad (\text{Ecuación. 26})$$

$$C_{central,p}^{capprocess} = C_{cen,p}^F y_{cen,p} + C_{cen,p}^V F_{central}, \quad \forall p \quad (\text{Ecuación. 27})$$

❖ Ventas:

Las ventas (*Sales*) se medirán con la Ecuación (28), en la cual se hace la multiplicación del precio estimado para cada kg de **Ambrox**® ($\sum_{m1} Price_{m1}^{ambrox}$) por el flujo en kg enviado a los mercados (P_{m1}^{ambrox}), así como el precio de cada litro de bioetanol producido ($\sum_{m2} Price_{m2}^{ethanol}$) multiplicado por el flujo en litros enviado a los mercados ($M_{m2}^{ethanol}$).

$$Sales = \sum_{m1} Price_{m1}^{ambrox} P_{m1}^{ambrox} + \sum_{m2} Price_{m2}^{ethanol} M_{m2}^{ethanol} \quad (\text{Ecuación. 28})$$

❖ Rendimiento total:

La Ecuación (29) describe el rendimiento (*NP*) que se obtendrá para la cadena de suministro del **Ambrox**®, así como para el rendimiento obtenido de la producción de bioetanol, los cuales se basan en la cantidad de ventas obtenidas (*Sale*), restando el costo de capital (*Cost*) asociado a la producción por cada tonelada procesada.

$$NP = Sale - Cost \quad (\text{Ecuación. 29})$$

❖ Objetivo ambiental:

Otra evaluación que es sumamente importante es el impacto ambiental ocasionado por la implementación del proceso a escala industrial. Es por ello que se incluye el impacto global ambiental medido mediante el eco-indicador-99 (Geodkoop y Spriensma, 2000), el cual se basa en la metodología de análisis de ciclo de vida, esta incluye el impacto ambiental generado por el uso de sustancias o materiales específicos, rutas de procesamiento y actividades que son necesarias para alcanzar un proceso óptimo. El eco-indicador-99 se divide en 11 categorías de impacto, clasificados en tres daños ocasionados principalmente como se muestra en la Figura 2.8; este impacto se evalúa mediante la Ecuación (30):

$$EI_{Global} = EI_{rawmaterial} + EI_{BIOETHANOLPRO} + EI_{AMBROXPRO} \quad (\text{Ecuación. 30})$$

Se puede observar que en la Ecuación (30) se contemplan impactos generados por la producción de materia prima, bioetanol y **Ambrox**®, sin embargo para evaluar cada uno de estos

procesos es necesario analizar cada uno ellos de manera individual mediante el daño ambiental que genera cada uno como se puede observar en las Ecuaciones (31), (32) y (33):

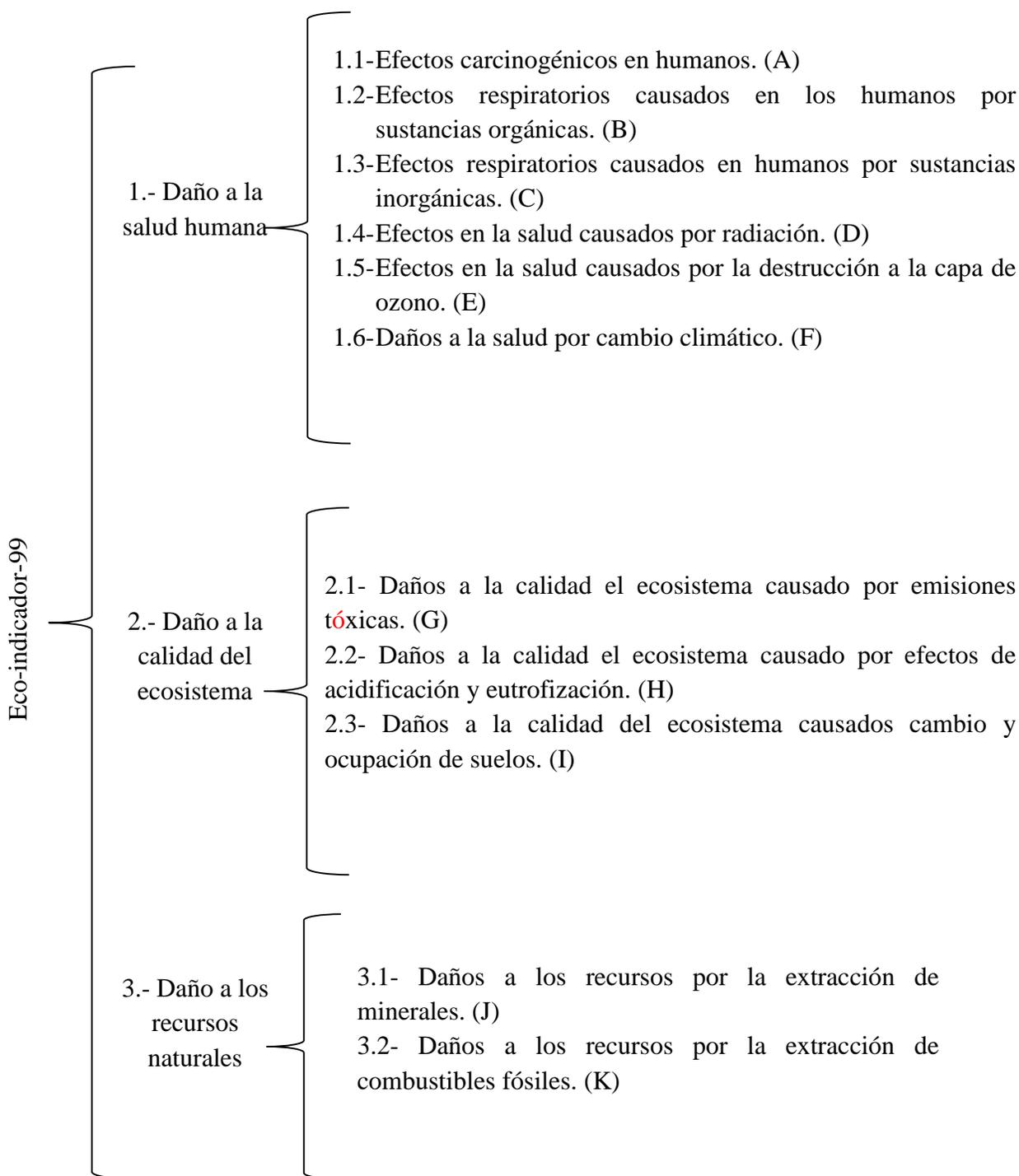


Figura 2.8 Diagrama de impacto ambiental.

$$EI_{\text{rawmaterial}} = D_{\text{HUMANHEALT}}^{\text{RMC}} + D_{\text{RESOURCES}}^{\text{RMC}} + D_{\text{ECOSYSTEM}}^{\text{RMC}} \quad (\text{Ecuación. 31})$$

$$EI_{\text{AMBROXPRO}} = D_{\text{HUMANHEALT}}^{\text{AP}} + D_{\text{RESOURCES}}^{\text{AP}} + D_{\text{ECOSYSTEM}}^{\text{AP}} \quad (\text{Ecuación. 32})$$

$$EI_{\text{BIOETHANOLPRO}} = D_{\text{HUMANHEALT}}^{\text{BP}} + D_{\text{RESOURCES}}^{\text{BP}} + D_{\text{ECOSYSTEM}}^{\text{BP}} \quad (\text{Ecuación. 33})$$

$$D_{\text{HUMANHEALT}}^{\text{RMC}} = \sum_i D_{\text{HE}}^{\text{Carcinogenic}} F_i + \sum_i D_{\text{HE}}^{\text{R-OrganicSubstances}} F_i + \sum_i D_{\text{HE}}^{\text{R-InorganicSubstances}} F_i + \sum_i D_{\text{HE}}^{\text{Ionizingradiation}} F_i + \sum_i D_{\text{HE}}^{\text{Ozonedepletion}} F_i + \sum_i D_{\text{HE}}^{\text{Climatechange}} F_i, \forall i \in I \quad (34)$$

$$D_{\text{ECOSYSTEM}}^{\text{RMC}} = \sum_i D_{\text{EC}}^{\text{ecotoxicemissions}} F_i + \sum_i D_{\text{EC}}^{\text{acidification}} F_i + \sum_i D_{\text{EC}}^{\text{landoccupation}} A_i^{\text{existing}} + \sum_i D_{\text{EC}}^{\text{landoccupation}} A_i^{\text{new}}, \forall i \in I \quad (35)$$

$$D_{\text{RESOURCES}}^{\text{RMC}} = \sum_i D_{\text{RE}}^{\text{fossilfuels}} F_i + \sum_i D_{\text{RE}}^{\text{mineral extraction}} F_i, \forall i \in I \quad (36)$$

$$D_{\text{HUMANHEALT}}^{\text{AP}} = AD_{\text{HE}}^{\text{Carcinogenic}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{HE}}^{\text{R-OrganicSubstances}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{HE}}^{\text{R-InorganicSubstances}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{HE}}^{\text{Ionizingradiation}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{HE}}^{\text{Ozonedepletion}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{HE}}^{\text{Climatechange}} P^{\text{ambrox}} \quad (37)$$

$$D_{\text{ECOSYSTEM}}^{\text{AP}} = AD_{\text{EC}}^{\text{ecotoxicemissions}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{EC}}^{\text{acidification}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{EC}}^{\text{landoccupation}} \text{NAVE} \quad (38)$$

$$D_{\text{RESOURCES}}^{\text{AP}} = AD_{\text{RE}}^{\text{fossilfuels}} P^{\text{ambrox}} + AD_{\text{RE}}^{\text{mineral extraction}} P^{\text{ambrox}} \quad (39)$$

$$D_{\text{HUMANHEALT}}^{\text{BP}} = \sum_{m2} BD_{\text{HE}}^{\text{Carcinogenic}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{HE}}^{\text{R-OrganicSubstances}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{HE}}^{\text{R-InorganicSubstances}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{HE}}^{\text{Ionizingradiation}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{HE}}^{\text{Ozonedepletion}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{HE}}^{\text{Climatechange}} M_{m2}^{\text{ethanol}}, \forall m2 \in M2 \quad (40)$$

$$D_{\text{ECOSYSTEM}}^{\text{BP}} = \sum_{m2} BD_{\text{EC}}^{\text{ecotoxicemissions}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{EC}}^{\text{acidification}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + BD_{\text{EC}}^{\text{landoccupation}} \text{NAVE}, \forall m2 \in M2 \quad (41)$$

$$D_{\text{RESOURCES}}^{\text{BP}} = \sum_{m2} BD_{\text{RE}}^{\text{fossilfuels}} M_{m2}^{\text{ethanol}} + \sum_{m2} BD_{\text{RE}}^{\text{mineral extraction}} M_{m2}^{\text{ethanol}}, \forall m2 \in M2 \quad (42)$$

Función objetivo: Una de las funciones objetivo de este trabajo (Ecuación (43)) es maximizar el beneficio total de la producción de **Ambrox®** a escala industrial, y simultáneamente reducir el impacto ambiental.

$$\text{Función objetivo} = (\text{máx profit}; \text{min EI}) \quad (\text{Ecuación. 43})$$

Donde los beneficios se contemplan como la mayor extracción de **Ambrox®** con la menor cantidad usada de materia prima, lo que se relaciona a su vez con mayores rendimientos en los procesos contemplando la disminución de costos involucrados en todo el proceso. De igual forma, el impacto ambiental será evaluado analizando todo el ciclo de vida de la “**Ageratina jocotepecana**”.

2.6. RECOLECCIÓN DE DATOS

Una vez que se establece el modelo matemático, es necesaria la recopilación de información necesaria para alimentar dicho modelo, siendo esto parte de la revisión bibliográfica. Los datos deben de tener la mayor cercanía a la realidad, debido a que de ello depende de que los datos que sean obtenidos como resultado puedan aportar conocimiento significativo para la toma de decisiones para la implementación del proyecto a escala industrial.

Sitios de cultivo

Se hizo una selección de los sitios en los que se puede cultivar **Ageratina jocotepecana**, éstos tiene como característica principal que son municipios del estado de Michoacán, puesto a que es el estado endémico donde fue encontrada la planta de manera silvestre. Los municipios se eligieron en base al clima y tipo de suelos con los que cuenta cada uno de ellos, cabe mencionar que las problemáticas de falta de empleo y migración afectan directamente el desarrollo social de cada uno de estos municipios, y del mismo estado. Es por ello que al contar con este tipo de proyectos se encuentra una alternativa para tratar de mitigar este tipo de problemáticas. Los sitios que se eligieron son Hidalgo, Pátzcuaro, Quiroga, Zacapu y Zitácuaro. El INEGI (2010) ha llevado durante muchos años la recolección de datos estadísticos de todo el país (número de habitantes, características geográficas de los sitios, actividades primarias, fuentes de empleo, desarrollo e incidencia de problemas que afectan a la sociedad), los cuales son utilizados en el presente trabajo. Uno de los datos más resaltantes para los sitios de cultivo es la existencia de

terrenos en los que se pueda cultivar la planta, y al ser una planta silvestre, tener un estimado de cuanta área actual se encuentra con esta especie y además la posibilidad de que se puedan realizar pluri-cultivos con los cultivos actuales en cada región identificada.

Tabla 2.1. Área disponible para el cultivo *AJ*.

Municipio	Área (ha)			
	Agricultura	Cultivada con <i>Ageratina jocotepecana</i>	Zona urbana	Total de cada municipio
Hidalgo	153,921.9	5.59	24,158.15	1,118,522.35
Pátzcuaro	182,621.6	2.09	19,519.34	419,973.15
Quiroga	84,450.9	1.02	6,860.92	204,095.47
Zacapu	180,221.0	2.15	21,156.97	430,055.32
Zitácuaro	209,709.2	2.410	27,733.56	482,077.73

(INEGI, 2010)

Rendimientos

Una vez que se tiene los sitios de cultivo para poder obtener la materia prima, se hizo un estimado de cuantas toneladas por hectárea se pueden obtener de la cosecha de *Ageratina jocotepecana*, esto se obtuvo a partir de un promedio entre varios tipos de cultivo que comparten características de crecimiento, además de tomar en cuenta que para los procesos de producto final sólo es necesario el tallo.

Entre los cultivos considerados se encuentran la caña de azúcar, maíz, trigo y sorgo (SAGARPA, 2011; 2012), el promedio estimado se puede observar en la cuarta columna de la Tabla 2. También se hizo una selección de datos para la producción de *Ambrox*® y bioetanol, los primeros están dados en base al estudio a nivel laboratorio llevado a cabo en el Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de la UMSNH (Gutiérrez-Pérez *et al.*, 2012); mientras que los rendimientos de producción de bioetanol se tomaron en base a otros estudios realizados a

partir de diferentes materias primas (Murillo-Alvarado *et al.*, 2013), estos datos se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Rendimientos y producción *Ambrox*® y bioetanol

Municipio	Bioetanol (%/ton) $(\beta_i^{ethanol})$	<i>Ambrox</i>® (%/ton) (β_i^{ambrox})	<i>Ageratina jocotepecana</i> (ton/ha) (α_i)
Hidalgo	0.75	5.31E-04	13
Pátzcuaro	0.74	5.01E-04	17
Quiroga	0.75	5.21E-04	20
Zacapu	0.74	5.15E-04	15
Zitácuaro	0.75	5.25E-04	10

(Murillo-Alvarado *et al.*, 2013; Gutiérrez-Pérez *et al.*, 2012; SAGARPA, 2011; 2012)

Empleos

El segundo paso en la cadena de suministro a partir de tener materia prima disponible, es llevar está a los sitios de procesamiento, en los que engloban actividades como la carga y descarga, transporte y procesamiento de *Ageratina jocotepecana*; estas actividades son mostradas en las Tablas 2.3 y 2.4, con cifras que fueron analizadas del procesamiento de caña de azúcar, debido a las características similares de procesamiento y las partes útiles de la planta para el producto final en las industrias azucareras es el tallo de la planta.

Tabla 2.3 Empleos generados en los sitios de cultivo.

Actividad	Número de empleos/ha	Número de empleos/ton*
Cultivo	0.05	1.022E-3
Crecimiento	0.05	1.022E-3
Cosecha	0.03	6.137E-4
Total	0.13	2.657E-3

*(Comisión de comercialización agropecuaria Veracruzana, 2010).

Tabla 2.4 Empleos generados en el proceso de manufacturación

Actividad	Número de empleos
Carga	10
Transporte de <i>AJ</i>	30
Descara	3
Manufacturación	30
Transporte a mercados	3
Producción de bioetanol	10
Total	86

Costos

Para el caso de costos de producción de la materia prima en los sitios de cultivo se genera un costo por hectárea cultivada y estos datos también se estimaron en base a los datos estadísticos de cultivos que compartan características y necesidades que puedan ser similares a las de la *Ageratina jocosotepecana* (caña de azúcar, trigo, sorgo y maíz), estos datos se muestran en la Tabla 2.5 y fueron obtenidos de SAGARPA, institución que cuenta con información para el caso del estado de Michoacán así como para el resto del país.

El procesamiento de *Ambrox*® genera costos (ver Figura 2.9), los primeros de ellos están asociados a los equipos necesarios para el procesamiento, que para el caso presente serán abordados posteriormente. Para el presente caso se estiman sólo los costos en base a gastos energéticos generados por cada proceso, estos datos se estiman en base al procesamiento de una industria dedicada a la producción de tableros a partir de madera, así como industrias dedicadas a la extracción de otras esencias, estos son contemplados en base al siguiente diagrama representativo del proceso y mostrados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.5 Costos de materia prima.

Costo (A/J)	
Concepto	\$/ha
Fertilización	147
Preparación del terreno	140
Cultivación	154
Corte	556
Pesticidas	49
Riegos	353
Intereses	151
Total	1550

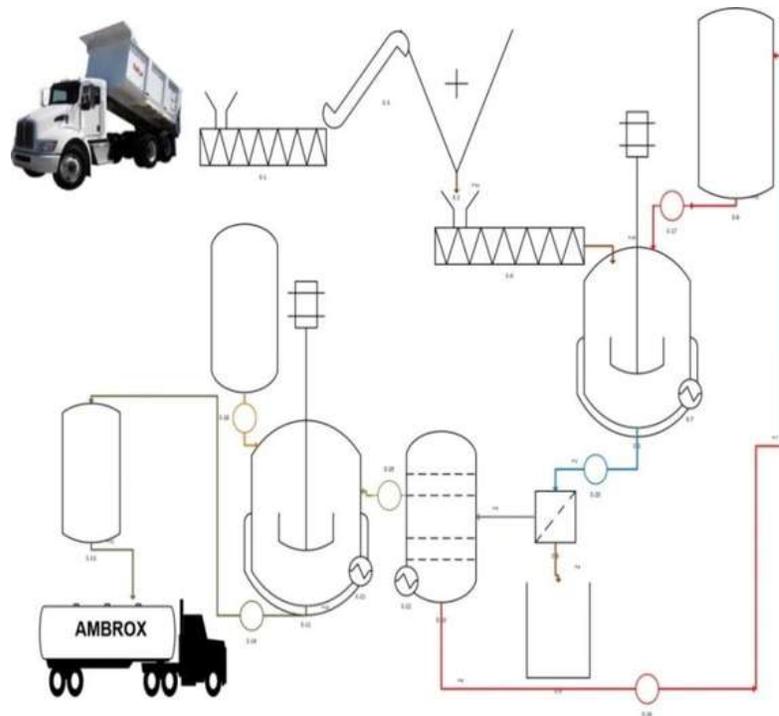


Figura 2.9 Producción de *Ambrox*®

Tabla 2.6 Costos de producción de *Ambrox*®

Concepto	Energía consumida kWh/ton	Costo (US\$/ton)
Banda transportadora	57.705	12.925
Astilladora	188.764	42.283
Secado	56.635	12.686
Centrifugado	37.757	8.457
Manipulación	35.194	7.883
Calentamiento	17.080	7.651
Evaporado	193.69	43.386
Agitado	30	13.440
Bombeo	3	4.032
Total	619.825	152.746

2.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para analizar la producción de *Ambrox*® se realizó la selección de los sitios de cultivo (municipios en el estado de Michoacán) eligiéndolos en base al tipo de clima y suelo que son aptos para el desarrollo de la planta, y después se realizó la programación en la plataforma GAMS con el objeto de evaluar el impacto social, ambiental y económico, obteniendo los resultados mostrados a continuación.

2.7.1. Área de cultivo

Actualmente se contempla que de manera silvestre se dispone de una superficie con *Ageratina jocosotepecana* (materia prima) de 13.26 ha en total (5.59 ha en Hidalgo, 2.090 ha en Pátzcuaro, 1.020 en Quiroga, 2.150 ha en Zacapu y 2.410 ha en Zitácuaro), lo cual corresponde al porcentajes menores al 0.001% de superficie de cada municipio seleccionado (INEGI, 2010) (véase Figura 2.10). Por lo que para satisfacer la demanda del mercado actual de 25 toneladas de *Ambrox*® anuales es necesario que se cultive 2,368.523 ha nuevas, lo que representaría el 2.8% del área que se tiene actualmente destinada para el uso de la agricultura en el municipio de Quiroga, el hecho de seleccionar Quiroga se basa en la elección optima de la ubicación de las nuevas parcelas para el cultivo de *Ageratina jocosotepecana* por la cercanía a la ciudad de Morelia, capital del estado que tiene mayor líneas de comunicación con los mercados finales de los

productos (INEGI, 2010). Se considera también que se cultive todo en un sólo municipio puesto a que con ello se elimina los gastos de transporte de materia prima en grandes cantidades.

La Figura 2.10 muestra en los recuadros rojos el área con materia prima de manera silvestre, el recuadro amarillo en el municipio de Quiroga representa el área necesaria para satisfacer la demanda de *Ambrox*® cultivando con *Ageratina jocotepecana*, en comparación con los recuadros verde oscuro que son el área que actualmente se tiene destinada para uso agrícola. La localización óptima para los sitios de cultivos en este caso dio como resultado Quiroga, debido a la cercanía con la unidad principal de procesamiento ubicada en Morelia. Por último, los recuadros grises sólo indican el área que se destina para zona urbana según datos del INEGI, el resto del mapa son áreas que no tienen ningún otro uso más que el de la vida silvestre en sus diferentes hábitats.

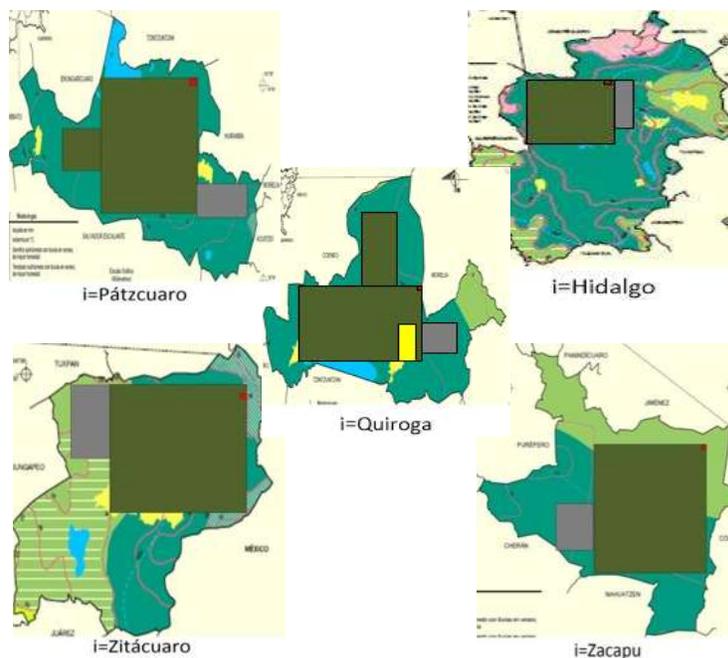


Figura 2.10 Áreas necesarias para cultivo de *Ageratina jocotepecana*.

Las Tablas 2.7 y 2.8 muestran los datos asociados a la generación de empleos en las diferentes actividades asociadas a la cadena de suministro, mientras que las Tablas 2.9, 2.10 y 2.11 muestran los aspectos ambientales. La Figura 2.11 muestra las variaciones entre los objetivos ambiental y económico considerados para la optimización. El punto A corresponde a la solución

con el máximo rendimiento (pero con el mayor impacto ambiental), mientras que el punto C corresponde a la solución con el mínimo impacto ambiental (pero con el mínimo rendimiento). También la Figura 2.11 muestra la comparación entre las rutas más usadas para producir el fijador en la industria, la producción a partir de la matanza del Cachalote, la ruta química a partir del Esclareol y la propuesta de la ruta a partir de *Ageratina jocotepecana*.

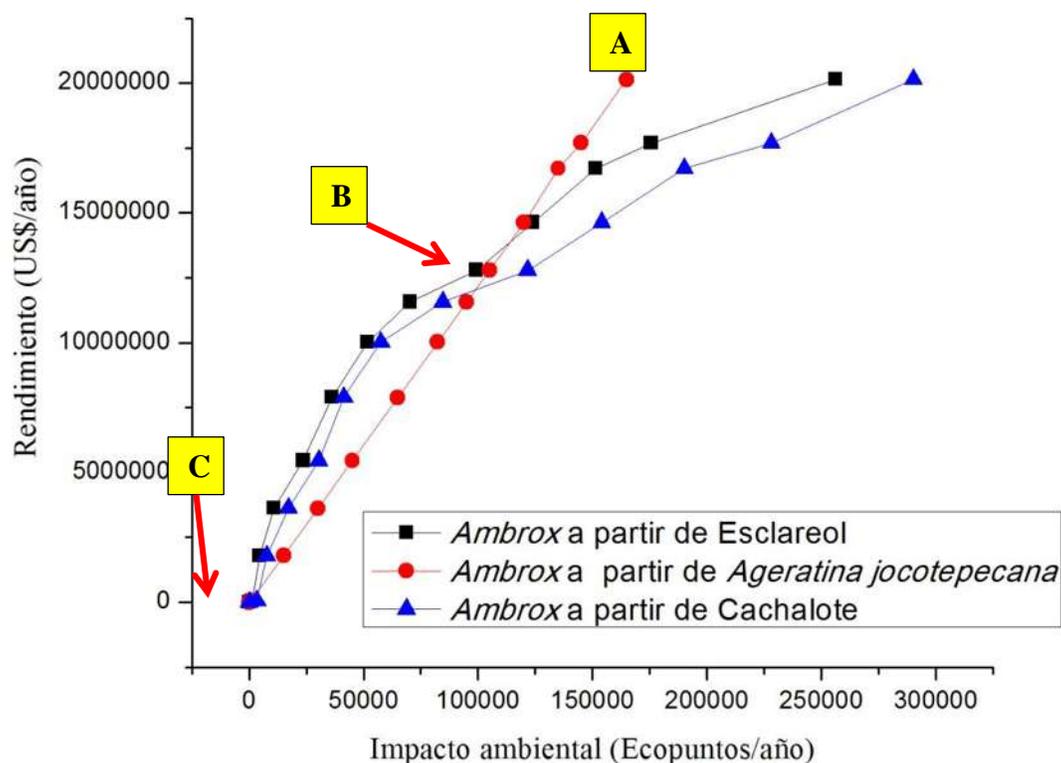


Figura 2.11 Comparación entre los objetivos ambientales y rendimientos

La mejor solución económica (Escenario A en la Figura 2.11), la cantidad de empleos generados son 633, los cuales representan una contribución significativa en el aspecto social. Para el aspecto económico son consideradas todas las actividades involucradas en la cadena de suministro; dando en los sitios de cultivo un gasto de US\$3,690,000/año, en el que se incluye preparación de suelo, fertilización, siembra y corte, por otro lado el costo de transporte de materia prima a las unidades de procesamiento da un monto de US\$30,000/año, mientras que los costos de procesamiento fueron US\$362,000/año y US\$462,000/año para la planta central y la de pre-procesamiento, respectivamente. Finalmente, el costo de transporte de los productos da un monto

anual de US\$68,337. En este sentido, las ganancias obtenidas por las ventas de **Ambrox**[®] y bioetanol son US\$20,132,000 y US\$36,000 por año, respectivamente. El impacto ambiental fue evaluado mediante la metodología del Eco-Indicador-99. Para el escenario A, el impacto ambiental fue de 165,000 puntos de Eco-indicador, en el que se evaluó el daño generado por todas las actividades involucradas en la cadena de suministro, partiendo desde los cultivos de *AJ* hasta la disposición de los productos. El valor del impacto ambiental se compone de 211,000 Eco-puntos/año aportados por el cultivo de materia prima, 3,358 Eco-puntos aportados por la producción de bioetanol y 347 Eco-puntos por la producción de **Ambrox**[®], menos 46,000 Eco-puntos que son positivos para el impacto ambiental, los cuales están asociados a la fijación de CO₂ por los cultivos. La Figura 2.12 muestra la configuración de la cadena de suministro para la mejor solución económica obtenida representada por la solución A. En esta solución sólo el municipio de Quiroga fue seleccionado como sitio de cultivo, debido a que la unidad central de procesamiento fue ubicada en la ciudad de Morelia, de igual forma en este mismo municipio se ubicó una planta de pre-procesamiento, la distancia entre ambos lugares es de 48 km. Las soluciones B (la Figura 2.13 muestra su configuración) y C (la Figura 2.14 muestra su configuración), en la curva Pareto representan escenarios en los cuales el impacto ambiental es reducido, sin embargo el rendimiento económico decrece proporcionalmente. Esto significa que dichas soluciones no satisfacen la demanda mundial de **Ambrox**[®] (25 toneladas/año); por otro lado, la solución C es la solución en la cual no se selecciona más área para el cultivo de *AJ*, solamente se procesa la cantidad contemplada de manera silvestre en cada uno de los sitios propuesto. Una alternativa para reducir el impacto ambiental, sin el sacrificio de la producción del **Ambrox**[®], es mediante el uso de energías renovables integradas al proceso. Las Tablas 2.12, 2.13 y 2.14 muestran las comparaciones para las tres soluciones representadas en la Figura 2.11.

Tabla 2.7 Empleados generados y costos asociados con la producción de *AJ*.

Actividad	Empleos generados (Empleos/ha)	Costos (US\$/ha)*
Cultivo	0.137	994
Cosecha	0.129	556
Transporte	0.0004332	1.28

*La distancia base para estos costos es 42 km.

Tabla 2.8 Generación de empleos por la producción de *Ambrox*® y bioetanol.

Actividad	Empleos/ton
Procesamiento en las plantas de pre-proceso	0.25
Transporte de <i>Ambrox</i> ® entre plantas	1.00
Transporte de bioetanol a la planta central	1.00
Procesamiento en la planta central	0.25
Transporte de <i>Ambrox</i> ® a los mercados	2.00

Tabla 2.9 Valores para los daños ambientales asociados a la producción de bioetanol.

Emisiones al aire	Compuesto	Emisiones por tonelada de <i>AJ</i>	EI-99 asociado (Eco-Puntos)	Tipo de daño
1	CO_2	3.37	0.00545 por tonelada de emisión	0.0183 F

*Las letras en la columna 5 representan el tipo de daño asociado por cada compuesto, dichas letras se describen en la Figura 8.

Tabla 2.10 Valores asociados a los daños ambientales por el cultivo de *AJ*

Descargas al agua	Compuesto	Emisiones por tonelada de <i>AJ</i>	EI-99 asociado (Eco-Puntos)	Tipo de daño
1	PO_4^{3-}	382.1	-	-
2	NO_3^-	194	-	-
3	Pesticidas	45 por ha	0.000395 Factor*ha*año	0.0177 G
Emisiones al aire				
1	CO_2	192	0.00545 Factor*ton	1.04 F
2	NO_x	1.024	2.30, 0.445	2.3552 C, 0.455H
3	SO_x	0.062	1.42, 0.0812	0.088 C, 0.00503H
4	N_2O	0.2	1.79	0.358 C
5	NH_3	0.0776	2.21, 1.21	0.0171 C, 0.093H
Uso	Factor*m ² *año		0.00000749	I
Conversión	Factor* m ²		0.000268	I

*Las letras en la columna 5 representan el tipo de daño asociado por cada compuesto, dichas letras se describen en la Figura 8.

Tabla 2.11 Valores del daño ambiental asociado con la producción de *Ambrox*®.

Emisiones al aire	Compuesto	Emisiones por tonelada de AJ	EI-99 asociado (Eco-Puntos)	Tipo de daño
1	CO ₂	192.551	0.00545	1.049 F
2	NO _x	1.024	2.30, 0.445	C, H
3	SO _x	0.062	1.42, 0.0812	C, H
Uso	Factor*m ² *año		0.0655	I
Conversión	Factor*m ²		1.96	I
Energía a partir del petróleo	Factor*MJ usados		0.000204	K

*Las letras en la columna 5 representan el tipo de daño asociado por cada compuesto, dichas letras se describen en la Figura 8.

Tabla 2.12 Comparaciones de los resultados económicos (US\$/año).

Solución/Actividad	Labranza	Transporte de materia prima	Procesamiento	Transporte de Productos	Ganancia final
A	3,690,122	30,064	824,789	69,352	20,140,618
B	1,848,047	15,163	452,059	34,668	10,023,401
C	19,778	311	93,126	386	620

Tabla 2.13 Resultados para empleos generados.

Solución/Sector	Agrícola	Industrial	Total
A	633	43	676
B	317	22	339

C	4	2	6
----------	---	---	---

Tabla 2.14 Resultados para el impacto ambiental (Eco-puntos-EI99/año).

Solución/Sector	Materia prima	Bioetanol	Ambrox®	Sub-Total	CO₂ Fijado	Total
A	210,580	3,358	347	214,285	49,439	164,846
B	105,290	1,679	174	107,143	24,719	82,424
C	790	12	4	806	66	740

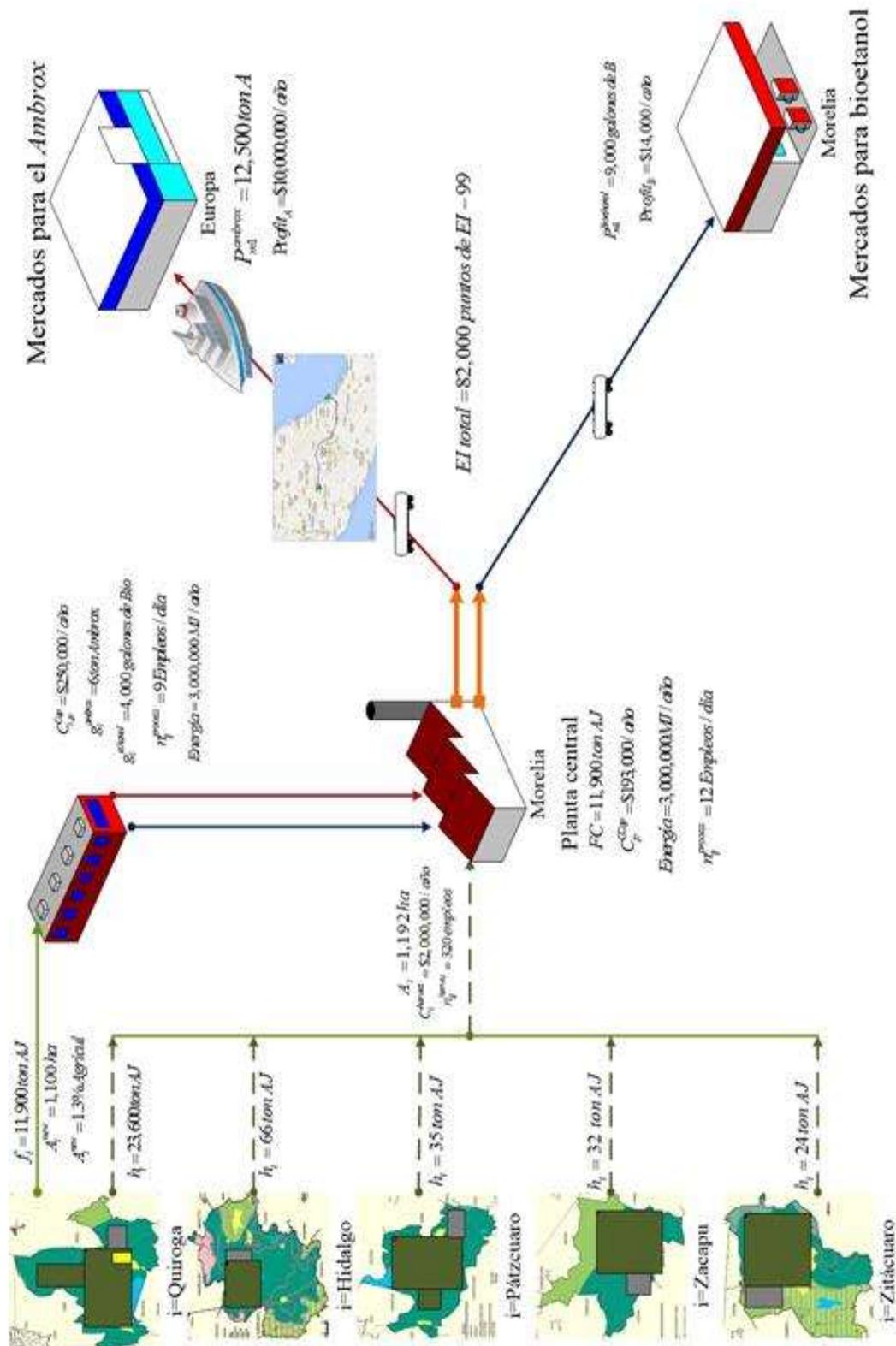


Figura 2.12 Configuración de la cadena de suministro asociada al escenario A

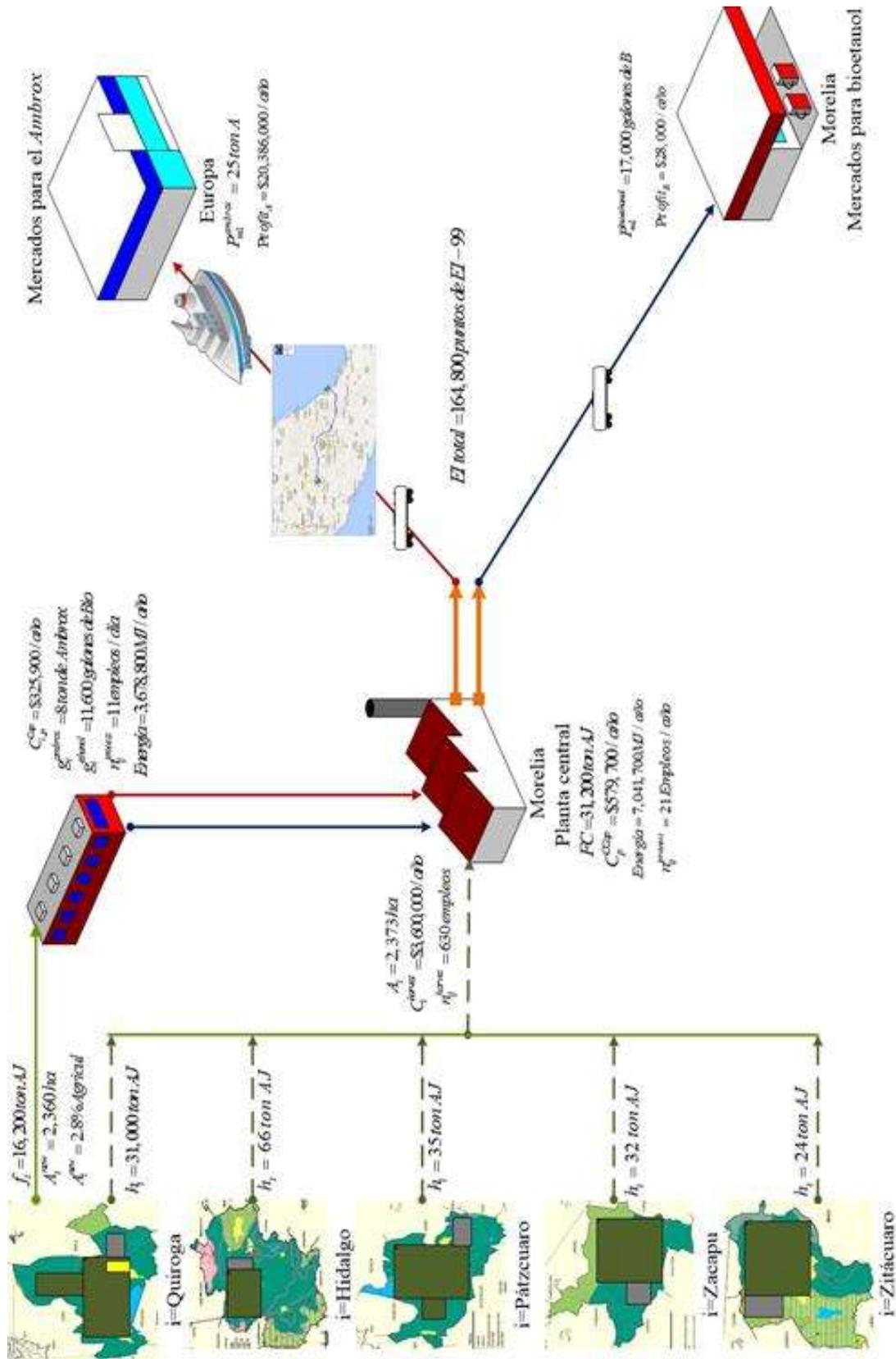


Figura 2.13 Configuración de la cadena de suministro asociada al escenario B

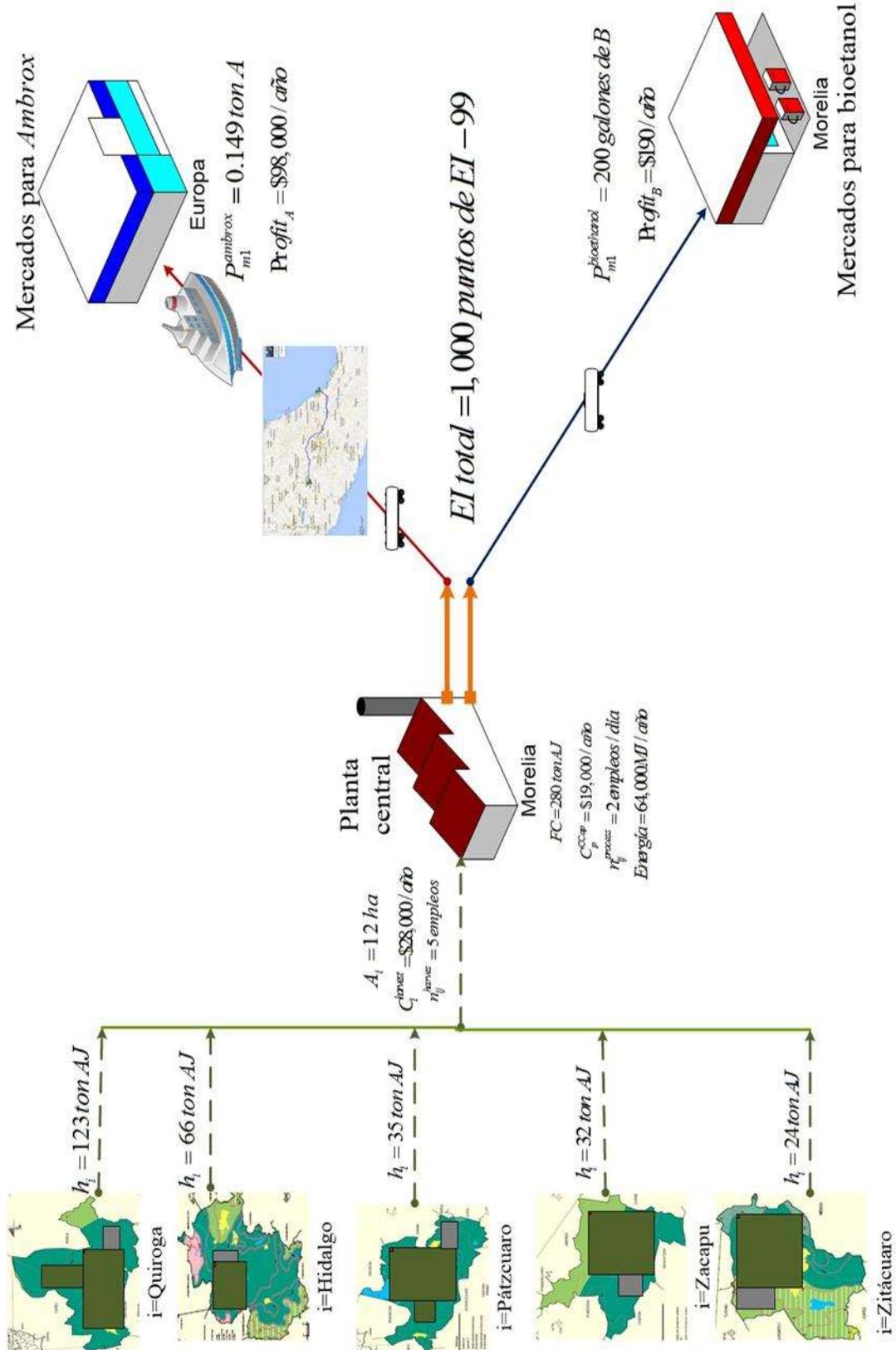


Figura 2.14 Configuración de la cadena de suministro asociada al escenario C

Capítulo 3

3. CASO DE ESTUDIO 2. RECONFIGURACIÓN ÓPTIMA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE BIOEREFINERÍAS

3.1. PANORAMA GENERAL

La producción de caña de azúcar para muchos estados de México es una de las actividades económicas primarias en el sector agrícola, hoy en día esta industria enfrenta grandes problemas relacionados a la fluctuación del precio del producto aunado a la falta de nuevas tecnologías que hagan más eficientes dichos procesos, problemas que impactan social y económicamente al productor de caña de azúcar. Por otro lado, en estos días el mundo entero debe enfocar sus objetivos en la reducción de consumo de combustibles fósiles, por lo se debe optar por el uso de energías alternas que tengan menor impacto ambiental como el caso de la energía eólica, geotérmica y los biocombustibles. Estas propuestas resultan alternativas que ayuda en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, muchas de estas tecnologías hasta hoy en día siguen en desarrollo, por lo que es necesario ampliar su estudio e integración con otros procesos, apoyándose en procesos actuales para generar beneficio económico sin dejar de lado el ambiente, ya que dichas integraciones ayudan a reducir gastos energéticos siendo inversamente proporcionales a los gastos económicos de los procesos.

3.2. PROBLEMÁTICA.

El problema abordado en este capítulo puede definirse como sigue: Dada una industria de la caña de azúcar dedicada a producir exclusivamente de azúcar, como lo es el caso actual en México, el problema consiste en determinar la reconfiguración óptima de esta industria que pueda satisfacer las demandas de azúcar, así como la producción de biocombustibles. Dicha biorefinería puede utilizar como materia prima residuos de la industria de la caña de azúcar y caña de azúcar adicional.

3.3. METODOLOGÍA.

En la Figura 3.15 se muestra una representación esquemática de la biorrefinería propuesta basada en la caña de azúcar, donde la caña de azúcar es usada como materia prima para llevar a cabo la producción de azúcar y bioetanol. En este sentido, el primer paso corresponde a la caracterización de la biomasa disponible (ver Figura 3.16).

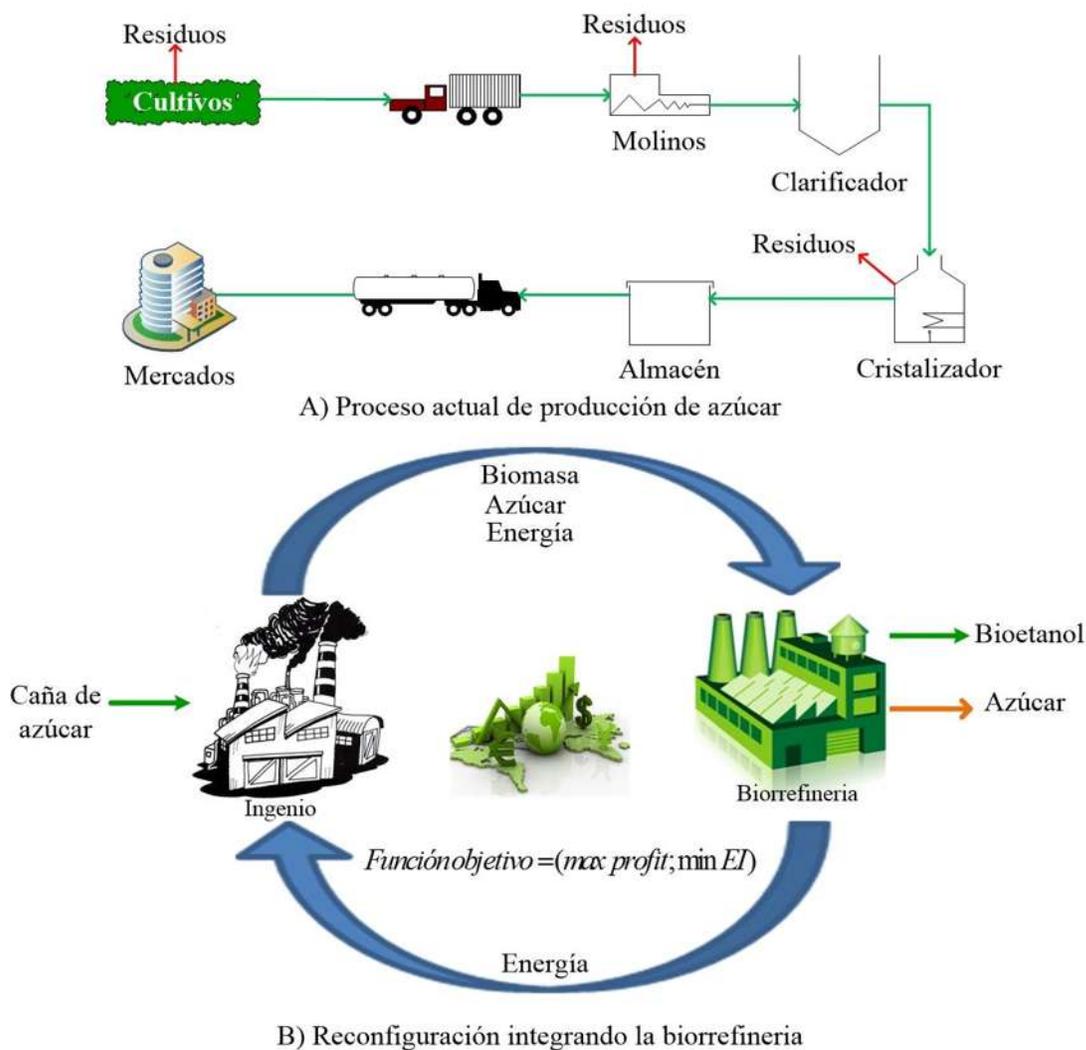


Figura 3.11 Reconfiguración de ingenios a biorrefinerías.

Posteriormente, la biomasa es llevada al molino (ingenio azucarero) donde es tratada para producir jugo rico en azúcares, el jugo se pasa a través de una serie de filtros para su posterior clarificado y cristalización. Durante este proceso, una cantidad de residuos son generados y

debido a sus características tienen un alto potencial para ser integrados a un proceso distinto por medio de una biorefinería (ver Figura 3.15b) dando valor agregado al proceso.



Figura 3.12 Composición de la caña de azúcar.*(Comisión Veracruzana, 2010)

3.4. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

El análisis del reajuste de una industria azucarera para producir una biorefinería integrada debe contener la cadena de suministro completa, incluyendo todas las actividades necesarias para la producción de la materia prima, cosecha, pre-tratamiento, procesamiento y distribución de los productos, como se muestra en las Figura 3.17. En la Figura 3.17a se considera el proceso global asociado a la trayectoria de la materia prima y sus residuos, incluyendo la producción de bioetanol a partir de azúcar, entre otros usos destinados (i.e., alimentación de ganado). La Figura 3.17b, por otro lado, muestra las primeras operaciones unitarias que se llevan a cabo en el proceso de producción de azúcar (pesado de la caña, extracción de jugo, clarificado, evaporación y cogeneración), en esta figura se puede observar que algunas flujos residuales (representados por las flechas) son reusados en otras operaciones. La Figura 3.17c, por su parte, muestra las siguientes operaciones unitarias cristalización, centrifugación, secado y empaçado, en esta sección se obtiene como residuo principal una enorme cantidad de *Cachaza*, la cual puede ser considerada como materia prima adicional a la integración de la biorefinería. Posteriormente, la Figura 3.17d muestra las unidades de procesamiento que son necesarias para llevar a cabo la producción de bioetanol, proceso integrado al existente (producción de azúcar). Para llevar a cabo el enfoque de optimización fue implementada la formulación desarrollada por Santibañez-Aguilar *et al.* (2014). En esta formulación, todas las actividades involucradas son consideradas evaluando el impacto social, económico y ambiental en una función multi-objetivo. Para el caso del objetivo económico se realiza un análisis basado principalmente en la maximización del rendimiento global, mientras que para el impacto ambiental global se cuantifica la minimización éste mediante el uso de la metodología del Eco-indicador-99 (Geodkoop y Spriensma, 2000). Por su cuenta, el impacto social queda en manos de la generación de empleos, teniendo un impacto benéfico para la sociedad en el caso de maximización, al desarrollo social.

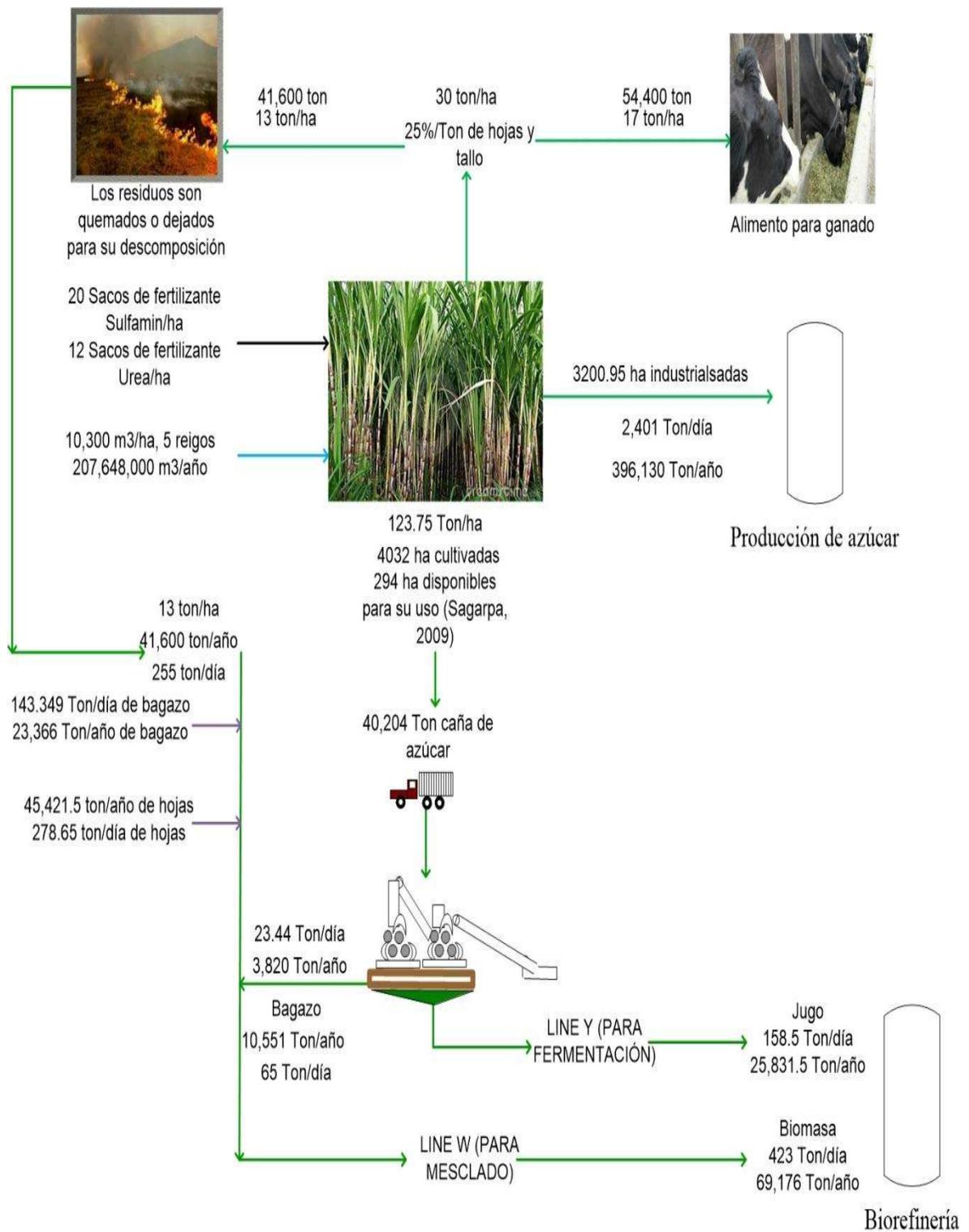


Figura 3.13a. Distribución de las materias primas para la integración de la biorefinería.

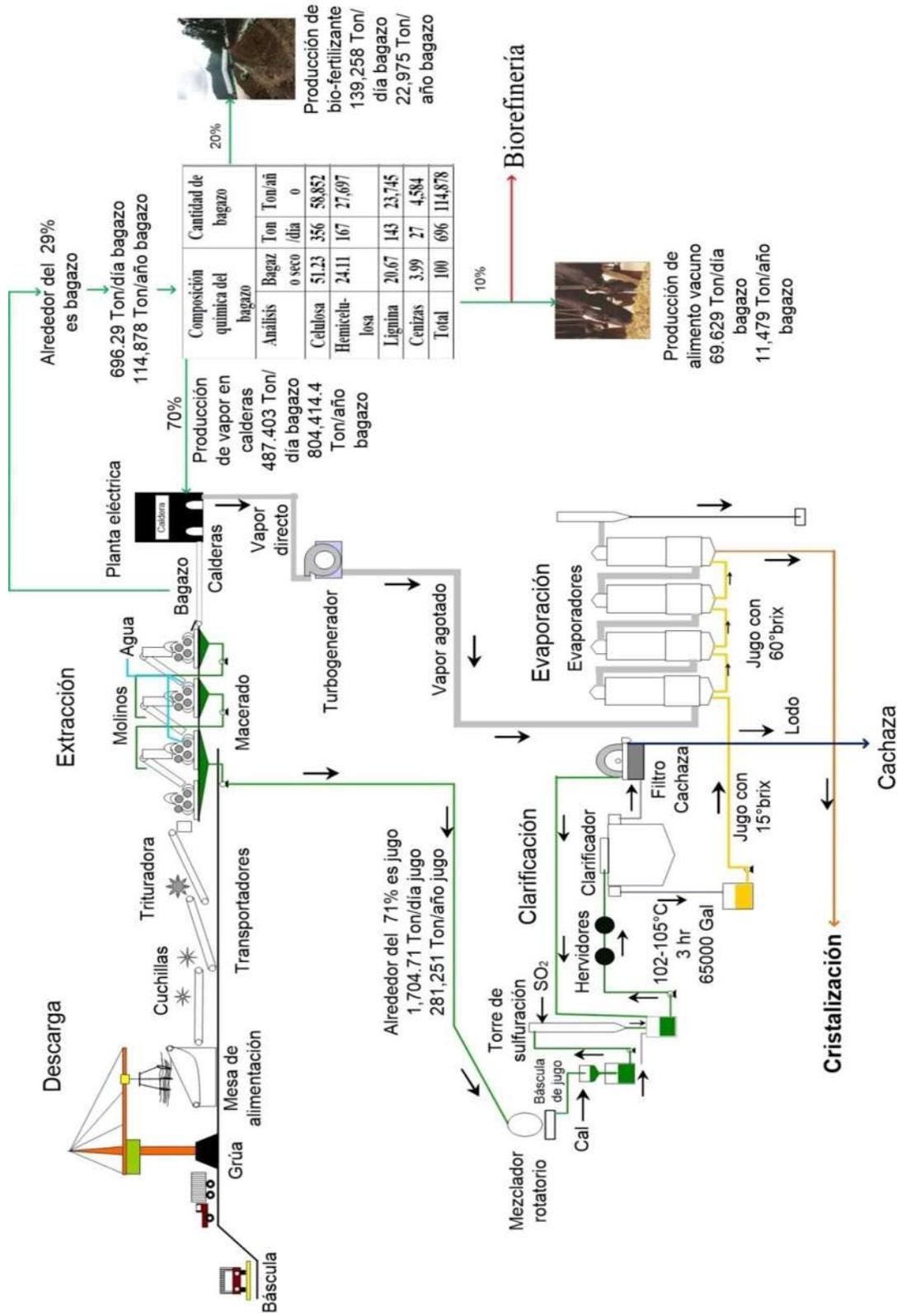


Figura 3.17b Producción de azúcar primera sección (Sección A).

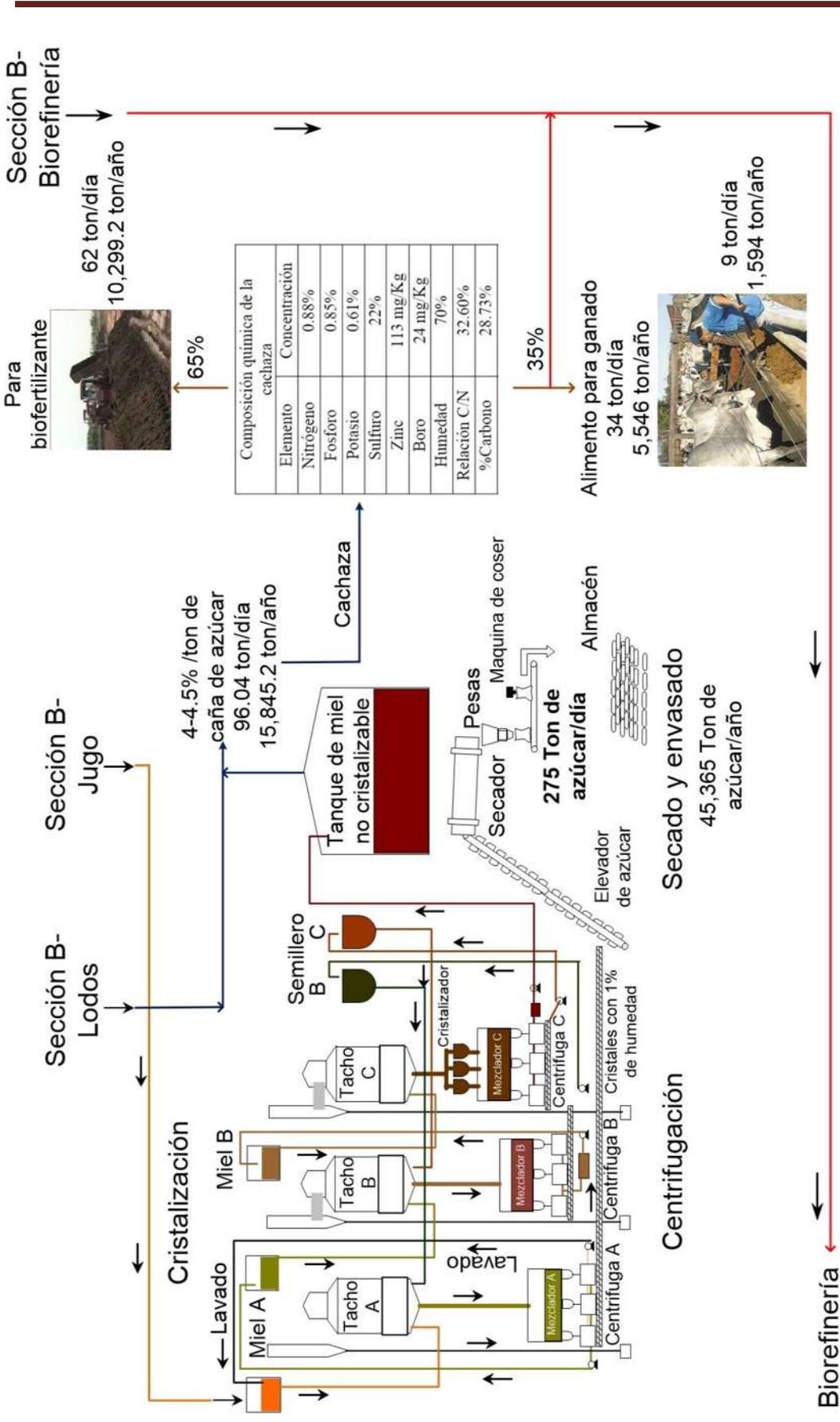


Figura 3.17c Producción de azúcar segunda sección (Sección B).

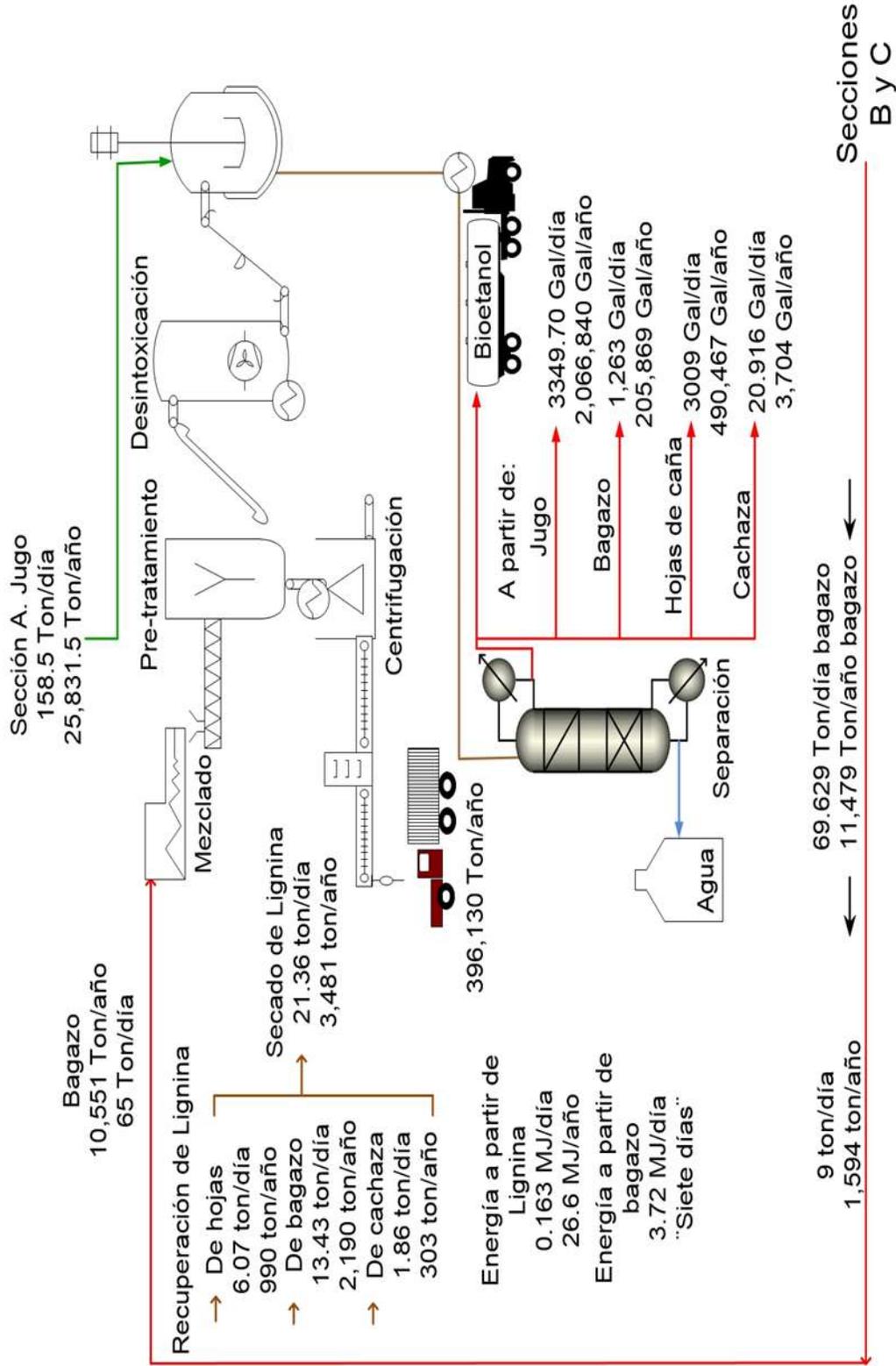


Figura 3.17d Biorefinería tercera sección (Sección D).

3.5. CASO DE ESTUDIO

Para este apartado fue considerado como caso de estudio la comunidad llamada Pedernales, localizada en el estado de Michoacán en México. Esta comunidad está dedicada a la producción de caña de azúcar, con el único objetivo de producir azúcar. Sin embargo, en años recientes, el bajo precio en el mercado asociado a este producto a nivel nacional ha tenido un impacto negativo para los productores. En este sentido, es atractivo considerar la reconfiguración del sistema de producción integrando una biorefinería, con el objetivo de darle un uso a los residuos producidos por la industria azucarera y con ello darle un valor agregado al proceso actual. Existe una gran cantidad de desafíos tanto económicos, ambientales y técnicos, los cuales deben ser considerados en la reconfiguración del sistema. Algunas de las cuestiones técnicas involucradas en la reconfiguración del sistema para producir productos adicionales son principalmente del tipo ingenieril (Véase El-Halwagi 2012; Kerron y El-Halwagi, 2013; Ponce-Ortega *et al.* 2013) como determinación de objetivos de diseño, diseño, integración y optimización del sistema.

La información del proceso fue obtenida a partir del reporte dado por Grupo Santos (2012). Aunado a esto, el INEGI (2010) reportó 4,032 hectáreas cultivadas con caña de azúcar, siendo sólo 3,200 industrializadas. SENER (2013) reportó un pronóstico acerca de la demanda de gasolina en México, en el cual se puede notar que la demanda promedio tendrá un aumento del 45% a nivel nacional. En este sentido, es necesario evaluar algunas otras fuentes alternas para satisfacer la demanda estimada, por lo tanto la reconfiguración de la industria azucarera existente a una biorefinería integrada, tomando en cuenta la evaluación del aspecto social, técnico, económico y ambiental, se convierte en una alternativa atractiva. Para evaluar este caso de estudio se tomaron en cuenta 6 escenarios diferentes en los que se proponen diferentes configuraciones bajo distintas condiciones, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados detallados a continuación.

3.6. RESULTADOS

Después de realizar los análisis económicos, ambientales y sociales para cada escenario, se generaron los resultados descritos a continuación.

3.6.1. Escenario A (Situación actual): Con el área actual industrializable, es posible producir 396,117 ton/año de caña de azúcar; la cosecha inicia con la quema de los campos, con lo que se

causa ciertas pérdidas de biomasa (41,600 ton/año). Posteriormente, el resto de las hojas son cortadas y usadas como alimento para ganado (54,400 ton/año), con la cantidad de biomasa restante (300,117 ton/año), se producen 45,369 ton/año de azúcar. Con esta producción es posible generar una ganancia de US\$3,408,000/año; el proceso actual se muestra en las Figuras 3.17b y 3.17c.

3.6.2. Escenario B (Producción de bioetanol a partir de residuos). Hasta ahora, una parte de las hojas de caña de azúcar son quemadas y el resto son usadas como alimento para ganado, en este escenario se propone el uso de este residuo. Por lo tanto, en lugar de usar las hojas como alimento para ganado son usadas junto con el bagazo y las melazas generadas en el proceso para la producción de bioetanol. La cantidad de cada residuo se encuentra enlistada en la Tabla 3.15, es importante resaltar que cada una de las materias primas se contempla la producción de bioetanol usando la misma ruta de producción de las referencias asociadas.

Tabla 3.15. Residuos obtenidos de la producción de azúcar.

Residuo	Cantidad de residuo (ton/ton de caña de azúcar)	Rendimiento de bioetanol (gal/ton residuo)
Hojas	0.30 ^B	38 ^D
Bagazo	0.29 ^B	48 ^B
Melazas	0.045 ^C	73 ^F
*Jugo directo	0.71 ^B	21 ^B

^BSENER 2006; ^CNguyen y Hermansen 2012; ^DInoue et al. 2010; ^FTaylor y Francis Group 2009

*El jugo directo solamente es contemplado para los escenarios C, D, E y F.

3.6.3. Escenarios C, D, E, F: Reducción en la producción de azúcar. Para la evaluación de estos escenarios se contempló una reducción de 25, 50, 75 y 100%, respectivamente, de la cantidad de materia prima usada para la producción de azúcar. Para todos los escenarios, el inventario de análisis de ciclo de vida fue realizado tomando en cuenta la metodología usada por Ometto *et al.* (2009), para cada actividad realizada en cada escenario (ver Tablas 3.16-3.24 del anexo), mientras que el impacto ambiental fue evaluado mediante la metodología del Eco-indicador-99

(ver Tablas 3.25-3.27 del anexo) (Geodkoop y Spriensma 2000). De manera similar, el impacto social fue evaluado en función de los empleos generados, mientras que la evaluación del impacto económico fue medida mediante el balance entre inversión para llevar a cabo ambos procesos (instalación de la planta para la producción de bioetanol y las actividades involucradas en el proceso) y las ganancias generadas.

3.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La curva Pareto (Figura 3.18) fue generada en base al modelo de optimización aplicado al análisis de diferentes escenarios, se puede observar que las ganancias incrementan 72% enfocando el proceso a obtener la mayor producción de bioetanol (Punto F), mientras que el impacto ambiental incrementa sólo 2% con respecto a la situación actual (Punto A), este incremento poco representativo en el impacto ambiental se debe a que el CO₂ generado por el uso de bioetanol es fijado por los cultivos de caña de azúcar, haciendo de ello un ciclo cerrado. Cabe mencionar que el punto A en la Figura 3.18 corresponde a la situación actual en la comunidad usada como caso de estudio, “*Pedernales*”, mientras que el resto de los puntos corresponden a la integración de producción de bioetanol al proceso de azúcar. Con los resultados obtenidos es posible comparar las opciones entre producción de azúcar y bioetanol tomando en cuenta la producción de cada uno por separado a la par evaluando el impacto ambiental, social y económico de la cadena de suministro.

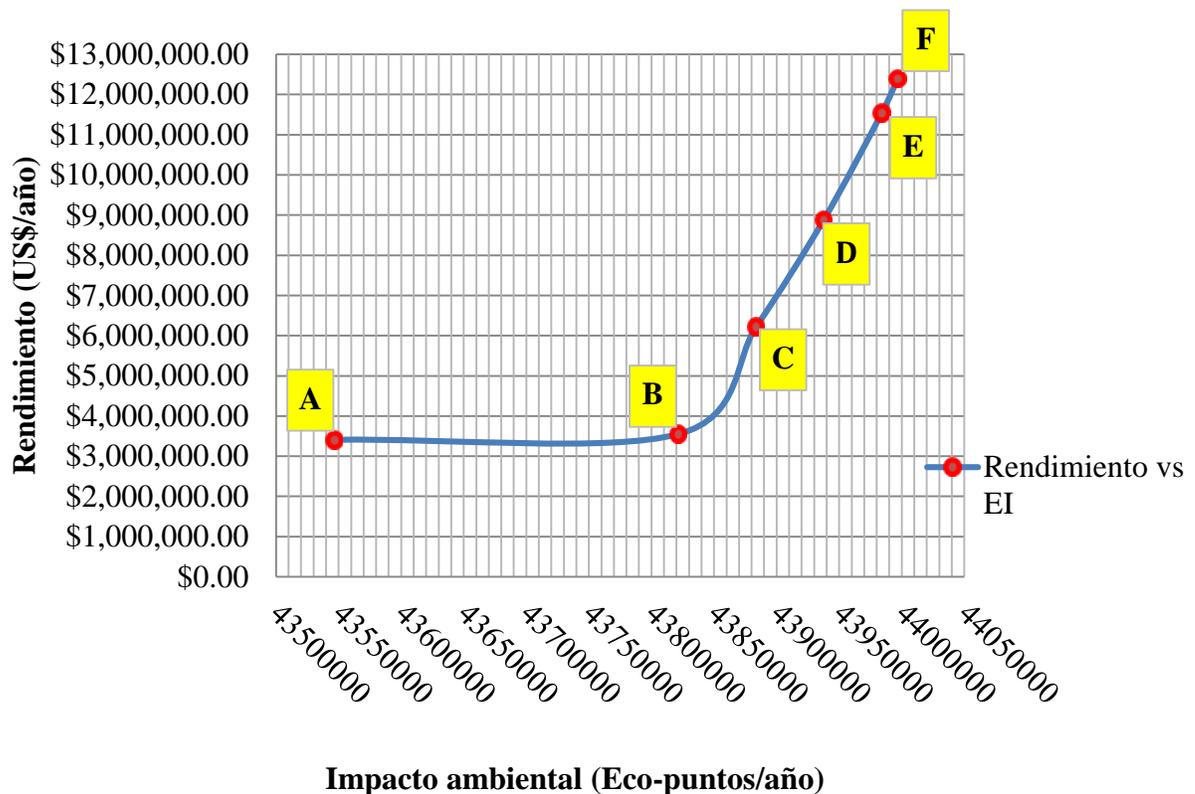


Figura 3.18 Curva Pareto para diferentes escenarios

3.7.1. Impacto ambiental. Este análisis fue realizado a través de la metodología del Eco-indicador-99, primero se llevó a cabo el análisis de ciclo de vida para cada proceso involucrado en el cadena de suministro (materia prima, producción de azúcar y bioetanol), evaluando las entradas y salidas de cada compuesto necesario en las actividades. La Figura 3.19a muestra la contribución al impacto ambiental de cada una de las actividades necesarias en la cadena de suministro. La contribución al impacto ambiental por la producción de bioetanol y azúcar son diferentes para cada escenario debido a que la cantidad de materia prima procesada para ambos productos, mientras que el impacto ambiental generado por el cultivo de caña de azúcar es el mismo (43,438,000 Eco-puntos/año); dado que la cantidad de materia prima cultivada es constante. La actividad que genera un mayor impacto ambiental es la correspondiente al uso de herbicidas, principalmente el uso de atrazina, 2,4D, arsénico, y 2,4,6-ticlorofenol en sus presentaciones comerciales como “*Faena, Velconate y Gexapas*”. Actualmente, este tipo de herbicidas son usados en los campos para la eliminación de maleza, sin embargo, el uso de estos

productos tiene un efecto negativo principalmente en la salud humana y la calidad del ecosistema; este impacto ambiental representa entre el 98-99% del impacto ambiental de cada escenario.

3.7.2. Impacto económico.

La Figura 3.19b muestra los costos de procesamiento, para el caso de la producción de azúcar y de bioetanol representados por las barras azul y rojo respectivamente, mientras que las ganancias generadas por las ventas representadas por las barras verdes y moradas, respectivamente. Nótese que para los escenarios B, C, D y E, las ganancias por la producción de bioetanol y azúcar incrementan el mismo monto de dinero (aproximadamente US\$4,023,000 y US\$6,571,000, respectivamente). Esto se debe a que la cantidad de materia prima procesada se mantiene constante para todos los escenarios, la única variación que se tiene es la cantidad de materia prima que es usada para uno u otro proceso. Para los escenarios A y B, los costos y ganancias de la producción de azúcar y ventas es el mismo dado que se mantiene la misma cantidad de toneladas de azúcar producidas, la única diferencia es que para el caso del escenario B se propone la integración de producción de bioetanol.

La Figura 3.19c muestra la comparación entre el costo total generado por la cadena de suministro, las ventas y ganancias del balance económico neto. Comparando las ganancias totales de los escenarios A y F, es posible apreciar que sin la producción de azúcar (Escenario F) las ganancias totales incrementan un 72%, sin embargo si toda la materia prima es usada para la producción de azúcar (Escenario a), las ganancias por venta de azúcar sólo alcanzan el 55% de las ganancias generadas por la venta de bioetanol.

Comparando el escenario B con el resto de escenarios (C, D, E y F), el costo total disminuye dado que la producción de azúcar es más caro que la producción de bioetanol. La mejor opción económicamente factible corresponde al escenario F, en el cual se opta por no producir azúcar, suponiendo que la demanda de azúcar se satisfaga a partir de otros cultivos. Aunado a esto, para hacer la producción de azúcar competitiva, se necesitaría que el precio del azúcar se elevara a US\$198 por tonelada.

Sin embargo, se tiene una demanda de azúcar a satisfacer a nivel nacional, de la cual el ingenio tomado para el caso de estudio (Ingenio Pedernales) debe aportar 33,340 ton/año, dado esto, la integración óptima de la biorefinería al proceso de producción de azúcar se muestra en el

escenario C, en el que se satisface la demanda de azúcar y además se acopla la integración de producción de bioetanol dando valor agregado al proceso principal.

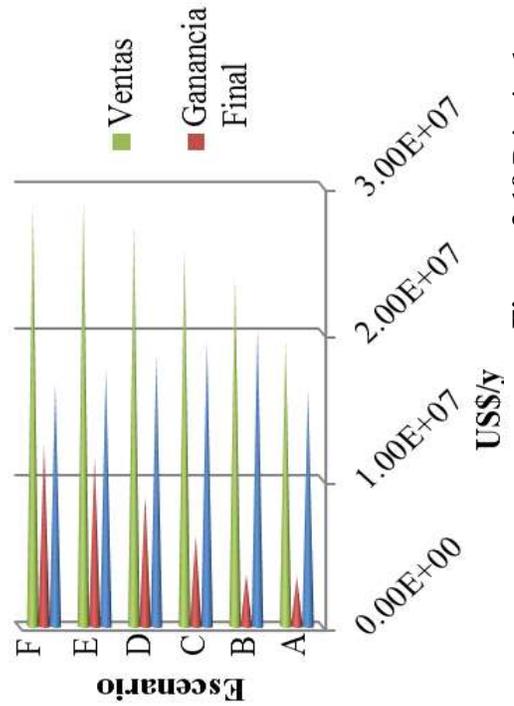
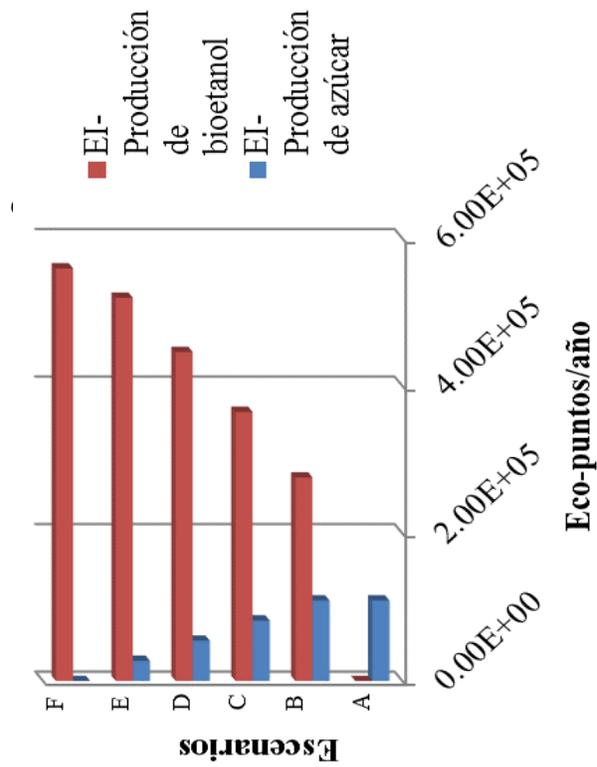
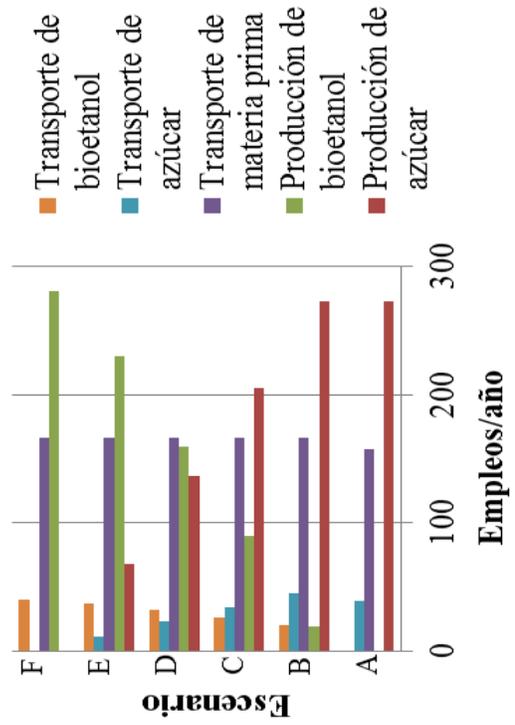
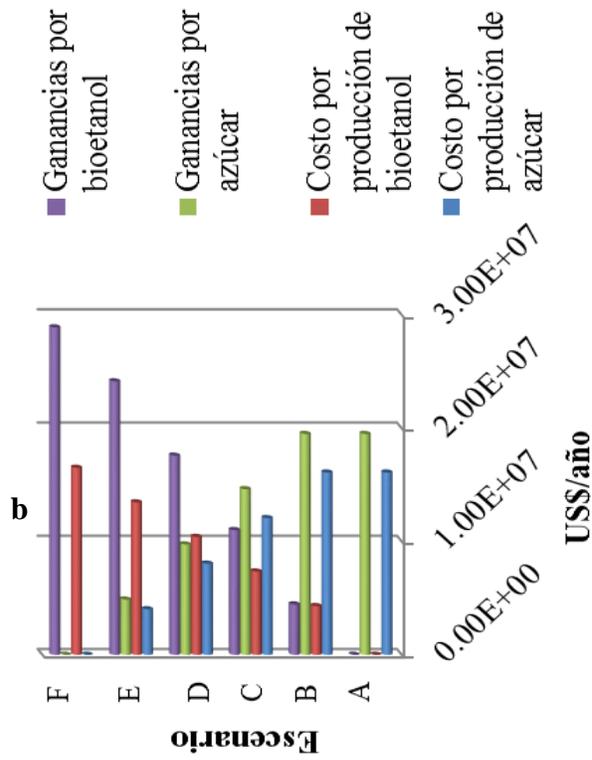


Figura 3.19 Principales resultados para el caso de estudio.

3.7.3. Impacto social: La medida usada para la evaluación de este impacto fue mediante los empleos generados. En la Figura 3.19d se muestran los empleos que cada una de las actividades genera en cada uno de los escenarios. La actividad que más impacto social tiene es la producción de la materia prima, ya que en ella se encuentra el 87% del total de los empleos generados, para cada escenario esta actividad tiene un valor de 3,504 empleos (Diferidos en actividades necesarias para el desarrollo del plantío). Cabe destacar que entre los escenarios B, C, D y E, la diferencia de empleos es del 0.1% (entre un escenario y otro). Por otro lado, para el caso en que los escenarios consideran la obtención de ambos productos (B, C, D y E), el número de empleos se incrementa con respecto a los escenarios que sólo consideran la obtención de un producto. Para el punto que se obtienen mayor cantidad de empleos generados es el escenario B, al compararlo con el escenario F, que es en el que se tiene la mayor ganancia económica, el número de empleos disminuye 0.89%.

4. CONCLUSIONES

- En esta tesis se abordó el análisis de la cadena de suministro de producción de *Ambrox*® y Bioetanol con el objetivo de evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos de cada uno de ellos, los resultados de ambos análisis muestran la configuración y reconfiguración óptima respectivamente para llevar a cabo dichos procesos a escala industrial.
- Se planteó un modelo matemático el cual involucro todas las actividades necesarias en la cadena de suministro de producción de *Ambrox*®, dichos modelos satisfacen los balances de masa y energía en el proceso, sin embargo para el caso del análisis del impacto ambiental se desarrollaron un gran número de ecuaciones debido a la cantidad de variables y parámetros involucrados en esta evaluación; cabe mencionar que el programa puede ser modificado en el caso de involucrar la integración de nuevos procesos que sean acoplados al proceso principal, con lo que se mejoraría el análisis haciéndolo más eficiente.
- Para el caso de la producción de *Ambrox*®, se realizó la comparación con las actuales rutas de producción existentes resultando que esta ruta propuesta representa no sólo una mejora económica sino que además se aúna el beneficio ambiental, evitando el peligro de extinción a una especie por un lado y por el otro disminuyendo el gasto de energía; mientras que el beneficio económico se traduce en el desarrollo social para la zonas involucradas en la producción por medio de la creación de empleos, principalmente en el estado de Michoacán.
- Por otro lado, con respecto a la producción de bioetanol como alternativa a la reconfiguración de la industria azucarera, se plantearon diferentes escenarios en los que se considera la coexistencia de ambos procesos variando la cantidad de materia prima usada para cada proceso, así como la integración de subproductos, evaluando los beneficios económicos, sociales y ambientales que genera cada uno individualmente, teniendo como respuesta la reconfiguración óptima de la industria sin dejar de lado el satisfacer la demanda de alimento (azúcar) y además proveyendo de este valuado biocombustible.

-
- Al realizar este tipo de estudios se tiene un panorama amplio acerca de la toma de decisiones que se deben implementar en procesos nuevos y actuales, teniendo una mejora continua que además de rendir beneficios económicos y sociales, reduzcan el impacto ambiental, ayudando con ello a mitigar el cambio climático.
 - En ambos procesos se provee de panoramas generales del diseño a escala industrial evaluados a detalle.
 - Para el caso de producción de **Ambrox**® una perspectiva puede ser el agregar el análisis de incertidumbre en los que se contemplen posibles problemas como plagas, heladas, cambio climático para los cultivos de *AJ*, los cuales intervengan en el cumplimiento o satisfacción de la demanda propuesta; así como también un análisis a fondo sobre mejores fechas de cosecha con las que se tenga un mejor rendimiento. Por otro lado los análisis de ciclo de vida se pueden ampliar en base al desarrollo de nuevas técnicas que generen una mayor cantidad de datos para una mejor evaluación del impacto ambiental en la que se contemplen una mayor cantidad de parámetros.

5. ANEXOS

Las Tablas (3.16-3.24) representan el análisis de ciclo de vida, para la evaluación del impacto ambiental mediante la metodología del Eco-indicador-99, en este análisis se involucran todas las actividades de para la producción de azúcar y bioetanol, en estas tablas el escenario B representa el 100% de producción de azúcar y la producción de bioetanol a partir de los residuos. Cabe mencionar que la cantidad de cada compuesto fue medida en kg/ha, kg/año; además de que el área contemplada se divide en área cultivada actualmente y área existente con la capacidad de ser usada. La evaluación se realizó para todos los escenarios mostrados en la Figura 18, sin embargo debido a que para todos es la misma evaluación sólo se presente el análisis para un escenario. Posterior al análisis de ciclo de vida es posible llevar a cabo la cuantificación del impacto ambiental, en la que se multiplican los factores de daño ambiental asociados a cada compuesto (flujo de la cadena de suministro) para dicha evaluación (véase Tablas 3.25-3.27).

Tabla 3.16 Análisis de ciclo de vida, preparación de suelo

Entradas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Carbonato de calcio (Del CaCO ₃)	47.2	1,730,000	117,600	1,613,000
Diésel	1.7	63,160	4,292	58,867
Aceite crudo (del diésel)	0.2	7,138	485	6,653
A)Pesticidas	0.05	1,945	132	1,814
Recursos renovables				
Agua (del diésel y CaCO ₃)	4,170	152,905,000	10,392,000	142,513,000
Consumo de energía	Cantidad (MJ/ha)	Cantidad (MJ/ producción total (año))	Área nueva	Área actual
Energía (Del diésel)	4.720E-04	17	1.1	16.1
Salidas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Emisiones al aire				
CO ₂ (del diésel y CaCO ₃)	1.1	74,189	37,094	37,094
Emisiones al agua				
Cl ⁻ (del diésel y CaCO ₃)	4.543E-04	31	15.5	15.5
Pb (del diésel y CaCO ₃)	3.127E-04	21	10.6	10.6
SO ₄ Del diésel y CaCO ₃)	3.068E-04	21	10.4	10.4

Tabla 3.17 Análisis de ciclo de vida, plantación de caña de azúcar

Entradas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Recursos no renovables				
Diésel	1.6	58,401	3,969	54,432
Aceite crudo IDEMATH	0.13	4,758	323	4,435

(del diésel)				
Aceite crudo ETH (del diésel)	6.490E-02	2,379	162	2,217
B) Pesticidas	2.950E-02	1,081	73	1,008
Recursos renovables				
Caña de azúcar (biomasa)	330	12,113,000	823,200	11,290,000
Agua (del diésel)	2.596E-02	951	64.6	887
Consumo de energía	Cantidad (MJ/ha)	Cantidad (MJ/ producción total (año))	Área nueva	Área actual
Energía	0.26	9,733	661	9,072
Salidas	Cantidad (Kg/ha)	Cantidad (Kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Emisiones al aire				
CO ₂ (del diésel)	0.7	25,523	1,734	23,788
NO _x (del diésel)	8.850E-03	324	22	302
Emisiones al Agua				
Aceite (del diésel)	1.121E-05	0.40	0.03	0.4

Tabla 3.18 Análisis de ciclo de vida, aplicación de químicos en el cultivo

Entradas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Recursos no renovables				
Carbonato de calcio	28.3	1,038,000	70,560	967,680
Nitrógeno N _{total}	6.9	254,368	17,287	237,081
Fosforo P ₂ O ₅	3.3	121,993	8,290	113,702
Potasio K ₂ O	8.7	320,124	21,756	298,368
Diésel	1.1	41,097	2,793	38,304
c) Pesticidas	0.4	14,708	999	13,708
Recursos renovables				0
Agua (del diésel)	280,564	10,285,778,790	699,034,000	9,586,745,000

Consumo de energía	Cantidad (MJ/ha)	Cantidad (MJ/ producción total (año))	Área nueva	Área actual
Energía eléctrica	1.3	48,018	3,263	44,755
Energía (del diésel)	0.4	14,275	970	13,305
Salidas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Emisiones al aire				
CO ₂ (del diésel)	1.5	56,021	3,807	52,214
Emisiones al agua				
Des-liming emissions	33	1,230,000	83,569	1,146,000
Emisiones desmagnetizadas	27	1,006,000	68,355	937,440
Emisiones flotantes	3.8	140,595	9,555	131,040
N	1.4	50,830	3,454	47,376

Tabla 3.19 Análisis de ciclo de vida de la cosecha

Entradas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Recursos no renovables				
Diésel	18	677,884	46,069	631,814
Aceite crudo IDEMATH (del diésel)	15	558,486	37,955	520,531
Aceite crudo ETH (del diésel)	3.7	137,134	9,319	127,814
Recursos renovables				
Agua (del diésel)	0.8	27,902	1,896	26,006
Consumo de energía	Cantidad (MJ/ha)	Cantidad (MJ/ producción total (año))	Área nueva	Área actual
Energía	59	2,179,000	148,102	2,031,000
Salidas	Cantidad (kg/ha)	Cantidad (kg/producción total (año))	Área nueva	Área actual
Emisiones al aire				
CO ₂ (del diésel)	67	2,449,000	166,462	2,283,000

				0
NO _x (del diésel)	5	201,375	13,685	187,689
CH ₄	2.5	92,143	6.262	85,881
CO	0.4	13,626	926	12,700
NO ₂	0.2	6,272	426	5,846
Hidrocarburos no CH ₄	0.1	4,109	279	3,830

Tabla 3.20 Análisis de ciclo de vida de producción de bioetanol

Entradas	Cantidad (kg/año)
Recursos no renovables	
Ácido sulfúrico	48,849
Recursos renovables	
Agua	512,307,000
Vapor	11,878,000
Consumo de energía	Cantidad (MJ/año)
Energía eléctrica	5,349,000
Salidas	Cantidad (Kg/año)
Emisiones al agua	
H ₂ SO ₄	48,849

Tabla 3.21 Análisis de ciclo de vida de la cogeneración de energía eléctrica.

Entrada	Cantidad (kg/año)
Recursos renovables	
Agua	63,169,000
Recursos no renovables	

Lubricantes	43
Emisiones al aire	
Partículas volátiles	7,601
NOx	6,392
Producción de energía	Cantidad (MJ/año)
Energía eléctrica	10,538,000

Tabla 3.22 Análisis de ciclo de vida de la distribución de bioetanol

Entradas	Cantidad (kg/año)
Recursos no renovables	
Diésel	5,744
Consumo de energía	Cantidad (MJ/año)
Energía (del diésel)	2,461
Salidas	Cantidad (kg/año)
Emisiones al aire	
CO ₂ (del diésel)	2,245
NOx (del diésel)	43

Tabla 3.23 Análisis de ciclo de vida del uso de bioetanol

Entradas	Cantidad (kg/año)
Emisiones al aire	
NOx	47,078

Tabla 3.24 Impacto ambiental: Daño a la salud humana

Categoría de daño		Saluda humana (Eco-puntos/año)						
Categoría de impacto		Carcinogénicos	Respiratorios/ orgánicos	Respiratorios/i norgánicos	Cambio climático	Radia ción	capa de ozono	Sub-Total
Preparación de suelo	* N A	27.5	-	1.1	14.7	-	1,517	1,560
	* A A	377.5	-	14.8	202	-	20,813	21,407
Cultivo de caña de azúcar	N A	225,136	-	50.7	9.4	-	-	225,196
	A A	3,088,000	-	695.5	129	-	-	3,088,000
Aplicación de químicos	N A	106	-	-	20.7	-	4,265	4,391
	A A	1,512	-	-	284	-	58,492	60,288
Cosecha	N A	-	209	32,457.6	1,621	-	25	34,313
	A A	-	2,880	445,132	22,232	-	342	470,587
Producción de azúcar		689	2.2	49,316	426	11.8	0.12	50,446
Producción de bioetanol		-	-	138,732	-	-	-	138,732
Co-generación		-	-	14,702	-	-	-	14,702
Distribución		-	-	99.3	12.2	-	-	111
Uso de bioetanol		-	-	108,280	-	-	-	108,280

*NA= Área nueva; *AA= Área actual.

Tabla 3.25 Impacto ambiental: Daño a la calidad del ecosistema

Categoría de daño		Calidad del ecosistema (Eco-puntos/año)			
Categoría de impacto		Emisiones eco-toxicas	Acidificación	Uso de tierra	Sub-Total
Preparación de suelo	NA	518	0.06	263,718	264,236
	AA	7,10	0.86	3,617,000	3,624,000
Plantación de caña de azúcar	NA	5,317	9.8	-	5,327
	AA	72,924	134	-	73,058
Aplicación de químicos	NA	-	1,036	-	1,036
	AA	-	14,216	-	14,216
Cosecha	NA	1.3	97.6	-	98.9
	AA	17.7	1,338	-	1,356.249
Producción de Azúcar		294	158	53,921	54,375
Producción de bioetanol		-	7,933	-	7,933
Co-generación		-	2,844	-	2,844
Distribución		-	19.2	-	19.2
Uso de bioetanol		-	20,950	-	13

***NA= Área nueva; *AA= Área actual.**

Tabla 3.26 Impacto ambiental: Daño a los recursos naturales

Categoría de daño		Recursos (Eco-puntos/año)			
Categoría de impacto		Minerales	Combustibles fósiles	Sub-Total	TOTAL
Preparación de suelo	NA	-	1,003	1,003	266,800
	AA	-	35,381,000	35,381,000	39,026,000
Siembra de caña de azúcar	NA	-	84.4	84.4	230,523
	AA	-	1,188	1,188	3,161,464
Aplicación de químicos	NA	-	24.1	24	5,452
	AA	-	329	329	74,834
Cosecha	NA	-	7,566	7,566	41,978
	AA	-	103,765	103,765	575,709
Producción de azúcar		213	4,051	4,264	109,087
Producción de bioetanol		-	0.4	0.4	146,666
Co-generación		-	36,047	36,047	53,594
Distribución		-	28	28.1	158
Uso de Bioetanol		-	-	-	129,230
					43,822,000

***NA= Nueva área; *AA= Área actual.**

6. Referencias

- Amini, M. & Li, H. Supply chain configuration for diffusion of new products: An integrated optimization approach. *Omega*. 39 (3), pp 313-322, **2011**.
- Bamufleh, H. S.; Ponce-Ortega, J. M.; and El-Halwagi, M. M. Multi-objective optimization of process cogeneration systems with economic, environmental, and social tradeoffs. *Clean Technological and Environmental Policy*. 15 (1), pp 185-197, **2013**.
- Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeruas, A.; Raman, R. GAMS-language guide. GAMS Development Corporation, Washington D. C., **2014**.
- Center for Chemical Process Safety. (2009). *Inherently Safer Chemical Processes*. New York: WILEY.
- Cucek, L.; Varbanov, P.S.; Kleme, J.J.; Kravanja, Z. Total footprints based multi criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. *Energy*. 44 (1), pp 135-145, **2012**.
- Diwekar, U. M. (2008). *Introduction to Applied Optimization*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh: Springer.
- Dunnett, A.; Adjiman, C.; Shah N. Biomass to heat supply chains applications of process optimization. *Process Safety and Environmental Protection*. 85 (5), pp 419-429, **2007**.
- Fráter, G.; Bajgrowicz, J. A.; Kraft, P. Fragrance Chemistry. *Tetrahedron*. 54 (27), pp 7633-7703, **1998**.
- Geodkoop, M.; Spriensma, R. The Eco-indicator 99 a damage oriented method for life cycle impact assessment, Methodology report and manual for designers. Technical report, PRÉ Consultants, Amersfoort, The Netherlands, **2000**.
- Grossman, I. E.; Perea-López, E.; Ydstie, B. E. A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers and Chemical Engineering*. 27 (8-9), pp 1201-1218, **2003**.
- Grossmann, I. E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. *Computers and Chemical Engineering*. 29 (1), pp 29-39, **2004**.
- Rodriguez, M. A.; Grossmann, I. E.; Vecchetti, A. R.; Harjunkoski, L. Optimal supply chain design and management over multi-period horizon under demand uncertainty. Part I:

-
- MINLP and MILP models. *Computers and Chemical Engineering*. 62 (1), pp 194-210, **2014**.
- Gutiérrez-Pérez, A. I.; González-Campos, J. B.; Del-Río-Torres, R. E. N. *Ageratina jocotepecana* source of tetranorlbdanodiol. IIQB-UMSNH. Morelia, Michoacán, Mexico. **2012**.
- INEGI. Handbooks municipal geographic information of the Mexican United States, Hidalgo, Pátzcuaro, Quiroga, Zacapu and Zitácuaro Michoacán. **2010**.
- Kim, J.; Realf, M. J.; Lee, J. H. Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*. 35 (9), pp 1738-1751, **2011**.
- Klemes, J. (2011). *Sustainability in the Process Industry: Integration and Optimization*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Madani, A.; Zbigniew, J.P. Linking supply chain strategy and processes to performance improvement. *Procedia CIRP*. 17 (1), pp 628-634, **2014**.
- Mansoornejad, B.; Chambost, V.; Stuart, P. Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Computers and Chemical Engineering*. 34 (9), pp 1497-1506, **2009**.
- Ming, X. and Zong-zhi W. Three-stage optimal method of land-use safety planning for chemical industry park. *Procedia Engineering*. 26 (1), pp 1844-1850, **2011**.
- Murillo-Alvarado, P. E.; Ponce-Ortega, J. M.; Serna-González, M.; Castro-Montoya, A. J.; El-Halwagi, M. M. Optimization of pathways for biorefineries involving the selection of feedstocks, products, and processing steps. *Engineering Chemistry Research*. 52 (14), pp 5177-5190, **2013**.
- Natural ingredients for cosmetics CBI Product Surver. The EU market for essential oils for cosmetics. **2009**. Indexo en: http://www.cbi.eu/system/files/marketintel/2009_Essential_oils_for_cosmetics1.pdf. Accesado en Junio del 2013.
- Nunes, F.M.N.; Imamura, P.M. A Convenient preparation of ambergris odorants from copalic acid. *Journal Brazilian Society of Chemical*. 7 (3), pp 181-186, **1996**.

Papageorgiou, L.G. Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*. 33 (12), pp 1931-1938, **2009**.

Pekal, L.M.; Tan, R.R.; Foo, D.C.Y.; Jezowski, J. M. Optimal energy planning models with carbón footprint constraints. *Applied Energy*. 87 (6), pp 1903-1910, **2009**.

Qin, S.; Yong-tao, S.; Zhao, L.; Ji-xiang, D. The impact of supply chain relationship quality on cooperative strategy. *Journal of Purchasing & Supply Management*. 14 (4), pp 263-272, **2008**.

SAGARPA. Bioethanol from beet:

<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/produccion-a-partir-de-la-remolacha.html>, 2012. Accessed January **2014**.

SAGARPA. Bioethanol from sorghum:

<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/produccion-a-partir-de-sorgo-dulce.html>, 2011. Accessed January **2014**.

SAGARPA. Bioproducts in Mexico:

<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/prouccion-a-partir-de-cana-de-azucar.html>, 2012. Accessed January **2014**.

Steenkamp, L. **2010**. Development of a two-step “green” synthesis for (-)-ambafuran production. 3rd Biennial Conference 2010. Science Real and Relevant. CSIR International Convention Centre, Pretoria, South Africa, 30 August – 01 September 2010, pp 34.

Subhadra, B. Water management policies for the algal biofuel sector in the Southwestern United States. *Applied Energy*. 88 (10), pp 3492-3498, **2011**.

Veracruz Commission for Agricultural Markets. Monograph sugarcane Veracruz, Mexico, **2010**

Winegar-Dobbs, S.; Martin-Hurent, T.; Oldfield, T. A. **2009**. Patent Fragrance fixatives. Eastman Chemical Company.

You, F. and Yue, D. Game-theoretic modeling and optimization of multi-echelon supply chain design and operation under Stackelberg game and market equilibrium. *Computers and Chemical Engineering*. 71 (1), pp 347-361, **2014**.

Zhang, Q.; Shah, N.; Wassick, J.; Helling, R.; Van-Egerschot, P. Sustainable supply chain optimization: An industrial case study. *Computers & Industrial Engineering*. 74 (1), pp 68-83, **2014**.

Zhu, J.; Ruth, M. The development of regional collaboration for resource efficiency: A network perspective on industrial symbiosis. *Computers, Environment and Urban Systems*. 44 (1), pp 37-46, **2014**.