



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

División de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Química



PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE BIOREFINERÍAS SUSTENTABLES EN MÉXICO

TESIS presentada por:

M.I.Q. PASCUAL EDUARDO MURILLO ALVARADO

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

DOCTOR EN CIENCIAS

EN

INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: D.C.I.Q. José María Ponce Ortega

Morelia, Michoacán

Mayo 2015

RESUMEN

PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE BIOREFINERÍAS SUSTENTABLES EN MÉXICO

Por

M.I.Q. Pascual Eduardo Murillo Alvarado

En este trabajo se proponen metodologías para la optimización de la cadena de suministro para la obtención de biocombustibles. En un primer caso de estudio, se propone una metodología para la optimización de la configuración de una biorefinería, donde se toman en cuenta la obtención de diferentes productos de alto valor agregado. Además, como materia prima se considera el uso de diferentes alternativas que por su estudio se conoce son una excelente alternativa para la producción de biocombustibles como el maíz, la *jatropha*, palma africana, paja de trigo, los residuos de la caña de azúcar y las micro algas. Los resultados muestran que uno de los biocombustibles con mayor potencial de producción es el biodiesel a través de la palma africana y las microalgas. Para el segundo y tercer caso de estudio, se proponen metodologías para la producción de bioetanol a partir de los residuos de la industria tequilera y de las regiones de cultivo de agave. En el segundo caso, se propone un modelo de optimización, para lo cual se considera que el flujo de materia prima proviene de los residuos de las regiones de cultivo de agave en México y de los desechos provenientes de la industria tequilera. El modelo considera que la producción de bioetanol es de acuerdo a los datos obtenidos en la planta piloto. De los casos de estudio propuestos, los resultados obtenidos muestran que a nivel económico la producción de bioetanol a partir de estos residuos es sustentable. Finalmente, en el último caso de estudio se propone un modelo de optimización multi-objetivo, en el cual se considera simultáneamente una función objetivo económico y una ambiental. Para el caso de la función objetivo ambiental se aplica la metodología del análisis del ciclo de vida considerando el Eco Indicador 99. Los resultados obtenidos muestran que a nivel económico y ambiental la producción de bioetanol es una forma sustentable del uso de combustibles en comparación con el uso de la gasolina.

Palabras clave: Biorefinerías, biocombustibles, optimización.

ABSTRACT

OPTIMAL PLANNING OF SUSTAINABLE BIOREFINERIES IN MÉXICO

by

M.I.Q. Pascual Eduardo Murillo Alvarado

Methodologies for the optimization of the supply chain for the production of biofuels are proposed in this work. In a first case study, proposes a methodology for the optimization of the configuration of a biorefinery, which take into account different products of high added value. In addition, as raw material is considered the use of different alternatives referred to by his Studio are an excellent alternative for the production of biofuels such as corn, Palm, jatropha, wheat straw, waste from sugar cane and the micro algae. The results show that one of biofuels with greater production potential is through the African Palm biodiesel and algae. For the second and third case study, proposed methodologies for the production of bioethanol from the waste of the tequila industry and the regions of cultivation of agave. In the second case, a model of optimization, intends for which it is considered that the flow of raw material comes from waste of agave cultivation regions in Mexico and wastes of the tequila industry. The model considers bioethanol production according to the data obtained in the pilot plant. Cases of study proposed, the results show that the production of bioethanol from waste is sustainable economically. Finally, in the last case study proposes is a multi-objective model of optimization, which is simultaneously considered a function economic objective and an environmental. In the case of the function environmental objective applies the methodology of the analysis of the life cycle whereas the Eco indicator 99. The results show that economic and environmental production of bioethanol is a sustainable way to the use of fuel in comparison with the use of gasoline.

Key words: Biorefinery, biofuels, optimization.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, IVONE ALVARADO ROMÁN y PASCUAL MURILLO VILLAGRANA, por darme su apoyo incondicional en cada parte de mi vida, por darme las herramientas y las bases como persona y por darme su apoyo para continuar con mis estudios y concluir con esta etapa, Gracias por estar a mi Lado.

A mi Hermana ERENDIDA IVONNE MURILLO ALVARADO, por ser mi compañera de vida y ejemplo para seguir adelante a pesar de las adversidades, Gracias por tu apoyo y consejos para concluir esta etapa con éxito.

A mis Sobrinas DIANA XIMENA y SARA DANIELA, por ser mi alegría y motor de mi vida, Gracias por llegar a mi vida.

A mi Asesor el DR. JOSE MARIA PONCE ORTEGA, por su apoyo y paciencia para sacar este proyecto adelante, por darme la confianza y la posibilidad de crecer profesional y personalmente. Gracias por darme las bases y la visión para continuar con esta profesión.

A mi Co-Asesor el DR. MEDARDO SERNA GONZALES, por brindarme su apoyo y tiempo para concluir con éxito este proyecto, por ser un ejemplo a seguir como persona.

A mi sinodales la DRA. NELLY RAMIREZ, el DR. AGUSTÍN CASTRO MONTOYA y el DR. FABRICIO NÁPOLES RIVERA, por sus observaciones y sugerencias, fueron de gran ayuda para mejorar y concluir este proyecto.

A VERÓNICA PATRICIA VILLEGAS RIVAS, por ser mi amiga, cómplice y compañera, Gracias por tu apoyo y por estar presente en cada momento.

A mis compañeros y amigos MA. GUADALUPE ROJAS y JUAN MARTINEZ GOMEZ, Gracias por brindarme su apoyo y sus consejos.

A mis compañeros de trabajo EZEQUIEL SANTIBÁÑEZ, RAMÓN GONZÁLEZ, KARLA ARREDONDO, FABIÁN Y JAVIER TOVAR, Gracias por darme su apoyo y sugerencias los cuales fueron de gran importancia para concluir este proyecto.

Al DR. MAHMOUD EL-HALWAGI, por darme la oportunidad de colaborar con él a través de este proyecto, por sus comentarios y sugerencias para enriquecer este trabajo.

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA por el apoyo brindado, sin el cual no hubiera sido posible concluir con éxito este proyecto, Gracias.

Finalmente, a la UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO, a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, por abrirme las puertas y permitirme realizar mis estudios de Doctorado en esta institución, por brindarme el espacio para sacar adelante este proyecto, a la planta docente y al personal administrativo que en algún momento de esta etapa me brindaron su apoyo, Gracias.

CONTENIDO

CONTENIDO	<i>i</i>
LISTA DE TABLAS	<i>iii</i>
LISTA DE FIGURA	<i>iv</i>
 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivo General	7
1.3.1 Objetivos Específicos	7
 CAPÍTULO 2. CONFIGURACIÓN DE UNA BIOREFINERÍA	
2.1 Planteamiento del Problema	8
2.2 Formulación de la Superestructura de Estudio	10
2.3 Formulación del Modelo Matemático de Optimización	12
2.4 Resultados Obtenidos	18
2.4.1 Escenario A (Solución Económica)	21
2.4.2 Escenario B (Producción de Bioetanol)	23
2.4.3 Escenario C (Producción de Biodiesel)	25
2.4.4 Escenario D (Producción de Bioetanol y Biodiesel)	26
2.4.5 Escenario E (Producción de 50% de la demanda de Bioetanol y 100% de la demanda de Biodiesel)	27
 CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE AGAVE	
3.1 Planteamiento del Problema	28
3.2 Formulación de la Superestructura de Estudio	31
3.3 Formulación del Modelo Matemático de Optimización	35
3.4 Resultados Obtenidos	48
3.4.1 Escenario A, satisfacer con el 1% de la demanda total de combustibles	50
3.4.2 Escenario B, solución sin restricciones	55
3.4.3 Escenario C, incremento de las áreas de cultivo de agave	58
 CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE AGAVE	
4.1 Planteamiento del Problema	62
4.2 Formulación de la Superestructura de Estudio	63
4.3 Formulación del Modelo Matemático de Optimización	66
4.4 Resultados Obtenidos	78
4.4.1. Escenario 1, cadena de suministro considerando los aspectos económicos y la minimización del impacto ambiental en daños al ecosistema	80

4.4.2. Escenario 2, cadena de suministro considerando los aspectos económicos y el impacto ambiental asociado a los daños a la salud humana.	86
4.4.3. Escenario 3, cadena de suministro considerando los aspectos económicos y el impacto ambiental asociado a los daños a los recursos.	89
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	94
REFERENCIAS	96
APÉNDICE	
A.1 Nomenclatura para la Metodología propuesta en el Capítulo 2.	101
A.2 Nomenclatura para la Metodología propuesta en el Capítulo 3.	103
A.3 Productos Obtenidos.	111

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1.	Datos para las Etapas de Procesamiento para el Caso de Estudio.	19
TABLA 2.2.	Disponibilidad de las Principales Materias Primas y su Costo.	20
TABLA 2.3.	Demanda de los Productos, Costo y Emisiones de GEI.	20
TABLA 3.1.	Eficiencias para el Proceso de Producción de Bioetanol.	34
TABLA 3.2.	Costo Unitario Fijo y Variable para cada una de las Unidades de Plantas Distribuidas y Centrales	47
TABLA 3.3.	Agave Disponible en las Principales Regiones de Cultivo de Agave en México (SAGARPA, 2013).	48
TABLA 3.4.	Demanda de Gasolina en México (SENER, 2013).	49
TABLA 3.5.	Distribución del Bioetanol Obtenido para el Escenario A.	51
TABLA 3.6.	Flujo de Bagazo de Agave que es Alimentado en Cada Planta en el Escenario B.	56
TABLA 3.7.	Flujo Total de Bioetanol Producido en la Solución Óptima del Escenario B.	56
TABLA 3.8.	Área de Terreno Adicional Requerida para el Incremento en el Cultivo de Agave para el Escenario C.	59
TABLA 3.9.	Agua Utilizada Considerada para el Incremento de Agave del Escenario C.	60
TABLA 3.10.	Agua Utilizada Considerada por el Incremento de Agave del Escenario C para la Producción de Bioetanol	60
TABLA 4.1.	Datos Obtenidos en la Base de Datos de Eco-Invent para el Análisis LCA.	79
TABLA 4.2.	Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto A del Escenario 1a.	82
TABLA 4.3.	Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B del Escenario 1a.	84
TABLA 4.4.	Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B' del Escenario 1b.	86
TABLA 4.5.	Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B del Escenario 2a.	89
TABLA 4.6.	Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B del Escenario 2a.	91
TABLA 4.6.	Resumen de las Escenarios Analizados.	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.	Posibles configuraciones para una biorefinería.	9
FIGURA 2.2.	Como proponer la superestructura para las configuraciones de biorefinería.	10
FIGURA 2.3.	Ejemplo para determinar las opciones de configuración de una biorefinería.	11
FIGURA 2.4.	Rutas químicas de procesamiento para la conexión entre dos componentes.	13
FIGURA 2.5.	Ruta de procesamiento óptima para escenario A.	21
FIGURA 2.6.	Curva Pareto Escenario A.	22
FIGURA 2.7.	Ruta de procesamiento óptima para el escenario B.	23
FIGURA 2.8.	Curva Pareto de las ganancias versus emisiones de GEI para el escenario B.	24
FIGURA 2.9.	Curva Pareto para el escenario C.	24
FIGURA 2.10.	Configuración óptima para el escenario D.	25
FIGURA 2.11.	Configuración óptima para el escenario E.	26
FIGURA 3.1.	Esquema del caso de estudio para la optimización de la cadena de suministro para la obtención de bioetanol a partir de los residuos del agave en México.	30
FIGURA 3.2.	Proceso Detallado para Producción de Bioetanol dentro de Plantas Distribuidas y Centrales.	31
FIGURA 3.3.	Principales fuentes de obtención de bagazo para la obtención de bioetanol.	32
FIGURA 3.4.	Diagrama de las diferentes etapas de procesamiento de la biomasa para la obtención de bioetanol.	32
FIGURA 3.5.	Superestructura propuesta para la optimización de la cadena de suministro considerando los residuos del agave en México.	33
FIGURA 3.6.	Cobertura de la demanda de bioetanol para el escenario A.	52
FIGURA 3.7.	Curva Pareto para el Escenario A.	53
FIGURA 3.8.	Área de distribución del bioetanol para el Caso 1.	54
FIGURA 3.9.	Áreas para la distribución del bioetanol del Caso 2.	55
FIGURA 3.10.	Distribución óptima para el Escenario B.	57
FIGURA 3.11.	Curva Pareto para el escenario B.	57
FIGURA 3.12.	Comparación de las curvas Pareto de los escenarios A y B.	58
FIGURA 4.1.	Caso de estudio para la cadena de suministro de la producción de bioetanol a partir de los residuos del agave en México.	64
FIGURA 4.2.	Superestructura para la formulación del modelo de optimización Multi-Objetivo del caso de estudio México.	65
FIGURA 4.3.	Diagrama de la biorefinería para el procesamiento del bagazo de agave.	66
FIGURA 4.4.	Curva Pareto curve para la minimización del impacto ambiental considerando los daños al ecosistema, tomando en cuenta la demanda fija y variable de combustibles.	81

FIGURA 4.5.	Cadena de suministro para la solución del punto A del escenario 1a.	81
FIGURA 4.6.	Cadena de suministro para la solución del punto B del escenario 1a.	83
FIGURA 4.7.	Cadena de suministro para la solución del punto B' del escenario 1b.	85
FIGURA 4.8.	Curva Pareto obtenida para el escenario 2.	87
FIGURA 4.9.	Cadena de suministro para la solución del punto B del escenario 2a.	88
FIGURA 4.10.	Curva Pareto obtenida para el escenario 3.	90
FIGURA 4.11.	Cadena de suministro para la solución del punto A del escenario 3a.	90
FIGURA 4.12.	Correlaciones entre las categorías de impacto consideradas.	93

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La principal fuente de energía hasta la actualidad ha provenido del petróleo. Sin embargo, se prevé un agotamiento en las reservas de los recursos fósiles en un corto plazo. Adicionalmente, la quema de estos combustibles libera cantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2) a la atmosfera, produciendo graves problemas ambientales ya que éste es la principal causa del calentamiento global. A partir de los biocombustibles se prevé que se pueda atacar el impacto ambiental negativo por el uso de energía procedente de los recursos fósiles, estos biocombustibles son obtenidos a partir de biomasa y especies de uso agrícola como el maíz, soja, girasol, palma, etc., debido a sus altos contenidos en carbohidratos. Los biocombustibles de mayor producción y uso a partir de la biomasa son el bioetanol y el biodiesel. Sin embargo, es posible obtener otros combustibles de gran uso como el biobutanol, bioturbosina, biogás, biohidrogeno, etc. Actualmente, la mayoría de las investigaciones están enfocadas en determinar las condiciones y configuraciones óptimas para una biorefinería. A partir del planteamiento de una biorefinería es posible establecer una estructura donde se integren los procesos de conversión de la biomasa y el equipo para la producción de biocombustibles, energía y otros productos de alto valor agregado. El concepto de una biorefinería es semejante al de refineries de petróleo, las cuales producen múltiples combustibles y productos a partir del petróleo. Por lo tanto, las biorefinerías son el camino más prometedor para la creación de una industria a partir de la biomasa. Con el mejor aprovechamiento de la biomasa dentro de una biorefinería es posible obtener numerosos biocombustibles para el desarrollo sustentable del sector energético.

Debido a la importancia de las biorefinerías, recientemente han sido reportadas varias investigaciones enfocadas al procesamiento de biomasa como materia prima para la obtención de diferentes productos. Huber et al. (2006), Saxena et al. (2008) y Goyal et al.

(2008) presentaron diferentes vías para obtener biocombustibles y productos bioquímicos. Tomando en cuenta las alternativas de materias primas disponibles, investigaciones como Kamm y Kamm (2007) y Fernando et al. (2006) presentaron los diferentes productos que pueden obtenerse a partir de materias primas lignocelulósicas. Algunos reportes como los de Crabtree y El-Halwagi (1994) presentan varias técnicas para la síntesis de componentes procedentes de la biomasa tomando en cuenta el impacto ambiental. También, Pistikopoulos et al. (1994) y Buxton et al. (1997) presentaron una metodología para la minimización del impacto ambiental considerando las alternativas de reacción. Trabajos, como los de Li et al. (2000) y Ng et al. (2009) presentaron métodos de optimización para determinar la ruta de reacción de una biorefinería. Se sabe que las técnicas de programación disyuntivas son importantes para resolver eficazmente los problemas de optimización. Por lo tanto, en el caso de las técnicas de optimización y decisión lógica, se han presentado numerosas investigaciones, trabajos como los de Raman y Grossmann (1994) y Lee y Grossmann (2000) presentaron técnicas para el modelamiento basado en programación lógica. Recientemente, se han presentado trabajos en los cuales se realiza un análisis sistemático para determinar la ruta óptima para una biorefinería tomando en cuenta la materia prima disponible, los productos intermedios y las rutas de diferentes procesos. En este contexto, Pham y El-Halwagi (2012) presentaron una metodología de optimización para determinar la configuración de una biorefinería a través de un enfoque sistemático. Ponce-Ortega et al. (2012) y Murillo-Alvarado et al. (2013) presentaron un modelo de optimización sistemática para determinar la configuración óptima de una biorefinería considerando varias posibilidades para determinar la ruta óptima de procesamiento. Moncada et al. (2014) reportaron la evolución de los biocombustibles en biorefinerías integradas en Colombia. Asimismo, se han propuesto varias rutas químicas y bioquímicas para la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos como paja de trigo, residuos de madera, diferentes tipos de bagazo, entre otros. En este campo, Kaparaju et al. (2009) propusieron la utilización de la paja de trigo para obtener diferentes biocombustibles como etanol, hidrógeno y biogás mediante pre tratamiento hidrotérmico. Algunas investigaciones tienen como propósito el estudio de la producción de biocombustibles, primordialmente el bioetanol, ya que actualmente es uno de los biocombustibles con mayor demanda. En este sentido, Huang et al. (2009) estudiaron el efecto de las diferentes especies de biomasa y el tamaño de partícula

en la producción de etanol celulósico. Dutta et al. (2010) presentaron una comparación económica de diferentes configuraciones de fermentación para obtener etanol a partir de varios microorganismos para observar las ventajas respecto a la configuración del proceso de producción. Además, Kazi et al. (2010) presentaron un análisis técnico-económico comparando varias rutas para la producción de bioetanol a partir de rastrojo de maíz y de materiales lignocelulósicos. Cardona et al. (2010) realizaron un análisis sobre la rentabilidad de la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos tomando en cuenta las opciones de pre-tratamiento y las transformaciones biológicas. Albernás-Carvajal et al. (2014) propusieron un modelo para el diseño óptimo del proceso de fermentación para la producción de bioetanol a partir de la melaza hidrolizada de bagazo de caña de azúcar. Alex-Marvin et al. (2012) presentaron un estudio de optimización enfocado en el valor presente neto a partir de cinco tipos de biomasa lignocelulósica para la producción de etanol. Además, González et al. (2012) presentaron un estudio sobre la simulación con rutas termoquímicas para producir bioetanol a partir de materiales celulósicos y lignocelulósicos. Kajaste (2014) reportó un estudio de los diferentes productos químicos que pueden obtenerse a partir de la biomasa. Algunos trabajos como Chouinard-Dussault (2011) y Martínez-Hernández (2013) incluyen integración de procesos en la producción de bioetanol. Para el caso específico de la producción de bioetanol a partir de los residuos del agave, se encuentran trabajos como los de Hernández-Salas et al. (2009), los cuales reportaron algunos datos experimentales y muestran la factibilidad del uso de bagazo de agave, y a partir del proceso de sacarificación obtener productos fermentados de alto valor agregado. Davis et al. (2011) presentaron un estudio sobre el potencial del agave como materia prima en la producción de biocombustibles en el contexto agrónomo y disponibilidad de tierra. Holtum y Chambers (2010) reportaron un estudio sobre la viabilidad del cultivo de agave en Australia para la producción de bioetanol. Saucedo-Luna et al. (2011) presentaron un estudio para la sacarificación enzimática y química del residuo lignocelulósico del agave para la producción de bioetanol y Núñez et al. (2011) determinaron la viabilidad económica de la producción biocombustibles a partir de agave en México. Murillo-Alvarado et al. (2014) presentaron un enfoque de optimización para el diseño de un sistema de biorefinerías tomando en cuenta los residuos de la industria del tequilera en México. En cuanto al enfoque de la optimización de la cadena de suministro para la producción de bioetanol, se han propuesto varias investigaciones, Van

Dyken et al. (2010) presentaron un modelo programación mixta-entera lineal (MILP) para el diseño de las cadenas de suministro de biomasa. Mele et al. (2009) presentaron la planificación óptima de las cadenas de suministro para la producción de bioetanol y azúcar considerando criterios económicos y ambientales. Además, Mele et al. (2011) presentaron un enfoque sistemático de optimización para el diseño y planificación de abastecimiento de las cadenas de suministro para la industria de la caña de azúcar tomando en cuenta aspectos económicos y ambientales. Akgul et al. (2011) presentaron un modelo MILP para el diseño de las cadenas de suministro de bioetanol. Karlsson et al. (2014) incorporaron cuestiones ambientales en la evaluación para la producción de bioetanol. Agostinho y Ortega (2013) presentaron un sistema de evaluación energética y ambiental para la producción de bioetanol en Brasil. Recientemente, se han propuesto algunas investigaciones enfocadas en establecer criterios de sustentabilidad en la optimización de la cadena de suministro durante la producción de biocombustibles. Bowling et al. (2011) realizaron un estudio para determinar un factor en la evaluación de la cadena de suministro considerando el efecto de las economías de escala. Alona et al. (2011) presentan modelos de programación mixta-entera lineal (MILP) para el diseño de las cadenas de suministro del bioetanol. Santibañez-Aguilar et al. (2011) propusieron un modelo de optimización multi-objetivo para la cadena de suministro asociada a una biorefinería involucrando aspectos económicos y ambientales; mientras que You et al. (2012) propusieron un modelo para la planificación óptima de las cadenas de suministro de biocombustibles considerando aspectos económicos, ambientales y sociales dentro de la función objetivo. Mota et al. (2014) presentaron un análisis de las cadenas de suministro en Portugal tomando en cuenta aspectos económicos, ambientales y sociales. Kostin et al. (2012) propusieron un modelo MILP para el diseño de las cadenas de suministro de bioetanol tomando en cuenta simultáneamente diferentes metodologías para el análisis del ciclo de vida. Sabio et al. (2012) propusieron un modelo multi-objetivo para el diseño óptimo de redes de hidrógeno considerando diferentes indicadores ambientales. Martinez-Hernandez et al. (2014) reportaron un análisis económico y ambiental para biorefinerías. Kelloway y Daoutidis (2014) presentaron un proceso sistemático para el diseño de biorefinerías. Gong y You (2014) desarrollaron un enfoque de optimización global para el diseño de biorefinerías.

Algunas otras investigaciones presentan diferentes consideraciones en la instalación de una biorefinería como Vujanovic et al. (2014), donde incorporaron aspectos de

incertidumbre en el análisis de biorefinerías. Guillén-Gosálbez y Grossmann (2010) propusieron una metodología para el diseño óptimo de las cadenas de suministro considerando el impacto ambiental con aspectos de incertidumbre en la cuantificación de las emisiones a través del análisis del ciclo de vida. Tay et al. (2013) presentaron un enfoque de optimización para la síntesis de biorefinerías bajo criterios de incertidumbre. El-Halwagi et al. (2013) reportaron una metodología incorporado cuestiones de seguridad en el diseño de las cadenas de suministro de una biorefinería.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, en la producción de biocombustibles no se han considerado la optimización de las diferentes rutas de procesamiento de la biomasa, la disponibilidad y la demanda de los productos que pueden ser obtenidos. Las biorefinerías actuales están enfocadas en la producción de biocombustibles. Sin embargo, a partir de la biomasa es posible obtener otros productos de alto valor agregado como químicos, polímeros, productos especializados, etc. Existen numerosas configuraciones de una biorefinería para el procesamiento de la biomasa, donde es posible obtener diversos biocombustibles y múltiples productos de alto valor agregado, lo cual hace una tarea difícil la selección de la mejor ruta de procesamiento de la biomasa. En adición a esta problemática se encuentran las diferentes materias primas disponibles, lo cual es un punto importante a considerar para el mejor aprovechamiento de los recursos, así como satisfacer la demanda de los productos para el mejor aprovechamiento económico de una biorefinería.

Debido a la problemática en la selección de la mejor ruta de procesamiento, en el presente proyecto se presenta un modelo de optimización, el cual considera la selección de configuración de una biorefinería de acuerdo a las diferentes rutas de procesamiento existentes, la selección de las materias primas disponibles, los diferentes biocombustibles y productos de alto valor agregado con la finalidad de obtener configuraciones que demuestren la factibilidad de las biorefinerías. Además, debido a que en los recientes estudios sólo se considera los aspectos económicos como principal objetivo y con un enfoque que se centra solamente en las tecnologías de producción a nivel económico, dejando de lado el impacto

ambiental asociado a la cadena de suministro para la producción de biocombustibles. Por lo tanto, el hecho de tomar en cuenta aspectos económicos como ambientales en el diseño óptimo de una biorefinería es de suma importancia, ya que es una forma de evaluar el potencial sobre el aprovechamiento de estos residuos y los posibles beneficios ambientales sobre producción de biocombustibles.

En el caso de la producción de bioetanol a partir de los residuos del agave, ya que la industria del tequila es una de las más importantes en México y es una industria que genera grandes cantidades de material lignocelulósico, los cuales pueden ser utilizados como materia prima para la producción de biocombustibles es necesario evaluar los aspectos tanto económicos, sociales y ambientalmente a lo largo de toda la cadena de suministro para la producción de biocombustibles, con el fin de determinar la solución óptima para un caso de estudio en específico. El diseño óptimo de la cadena de suministro asociado a un sistema de biorefinerías se basa en determinar los materiales lignocelulósicos disponibles (en este caso el bagazo de agave) que pueden ser utilizados como materia prima, la ubicación y capacidad de las plantas de procesamiento, las tecnologías utilizadas, la distribución de productos, así como todas las actividades de transporte involucradas. Esta metodología puede ser de gran aplicación ya que recientemente no se cuentan con investigaciones de este tipo y los cuales se basan en determinar la sustentabilidad de la producción y uso del bioetanol a partir de estas fuentes de materia prima. Las investigaciones existentes solo están enfocadas en determinar las mejores condiciones de operación de una planta de procesamiento así como el cálculo de las eficiencias de las etapas consideradas en la obtención del bioetanol. Por lo tanto, resulta ser de gran interés el determinar la cadena de suministro óptima y de esta forma evaluar los lugares con mayor potencial para la instalación de plantas de procesamiento para la obtención de bioetanol, así como la distribución de éste considerando la demanda de biocombustibles en cada región y así establecer la factibilidad a nivel económico la producción de bioetanol a través de los residuos del agave.

Sin embargo, para determinar la factibilidad y sustentabilidad de la cadena de suministro para la producción de bioetanol no sólo bastan los aspectos económicos. Por lo tanto, es necesario considerar los aspectos ambientales, los cuales permitan definir la sustentabilidad tanto del uso y producción del bioetanol en comparación con la gasolina. De

acuerdo con lo anterior, resulta ser de gran interés aplicar metodologías de análisis de ciclo de vida las cuales permitan determinar la sustentabilidad a nivel ambiental el bioetanol como combustible y además evaluar la sustentabilidad ambiental durante los procesos de producción y transporte tanto de materias primas y productos.

1.3 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo de investigación es proponer modelos matemáticos de optimización para determinar la configuración de biorefinerías integrando aspectos económicos, ambientales y sociales. La posible instalación de biorefinerías tiene como fundamento el uso de la biomasa para la obtención de biocombustibles y así disminuir el impacto ambiental y de esta forma disminuir el uso de los recursos fósiles como fuente de energía.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer un modelo matemático de optimización para determinar la mejor configuración de una biorefinería considerando aspectos económicos y ambientales a través diferentes alternativas de materia prima, así como la obtención de diferentes productos de acuerdo a la demanda de biocombustibles y productos de alto valor agregado.
- Proponer un modelo de optimización que considere los diferentes lugares para extraer biomasa procedente del agave, donde instalar los lugares de pre-procesamiento, y las unidades centrales para la obtención de bioetanol, y que cumpla simultáneamente con los criterios económicos, ambientales y sociales, considerando el caso específico de la región de México.
- Proponer un modelo matemático de optimización multi-objetivo para la cadena de suministro asociada a la producción de bioetanol a partir de los residuos procedentes de la industria tequilera y las áreas de cultivo de agave, considerando simultáneamente objetivos económicos y ambientales. Determinar a través del análisis del ciclo de vida el impacto ambiental global de la cadena de suministro.

CAPÍTULO 2. CONFIGURACIÓN DE UNA BIOREFINERÍA

En este Capítulo se muestra el estudio realizado para la configuración de una biorefinería considerando diferentes alternativas de materias primas, y la obtención de diversos bio-productos. Por lo tanto, se muestra la problemática del caso de estudio, el planteamiento del modelo matemático para encontrar la configuración óptima considerando aspectos económicos y ambientales, finalmente, se muestran los resultados obtenidos.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al incremento actual en las emisiones de gases de efecto invernadero causado por el alto uso de combustibles petroquímicos las investigaciones se han centrado en la producción de biocombustibles a partir de biomasa porque esto ofrece el potencial a la solución de este problema. Por lo tanto, la biomasa puede ser una buena alternativa para la obtención de biocombustibles como un proceso sostenible, de tal forma que se reemplace el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, es necesario considerar varios factores antes de la producción de combustibles a nivel industrial, por ejemplo, la optimización para la selección de la materia prima, las etapas de pre-procesamiento, las tecnologías procesamiento disponibles y los productos que pueden ser obtenidos, tanto biocombustibles como otros bio-productos de alto valor agregados (es decir, productos químicos, polímeros, etc.). El procesamiento de biomasa se realiza en las instalaciones industriales llamadas biorefinería, donde la biomasa es procesada través de tecnologías de procesamiento físicas, químicas y/o biológicas para la obtención de los biocombustibles, y otros productos (ver Figura 2.1). Se pueden considerar diferentes tipos de materias primas, y las rutas de procesamiento dependen de la biomasa seleccionada debido a que el contenido de componentes químicos es diferente,

entre los cuales se pueden incluir lignocelulosa, azúcares, almidón y lípidos. Según el contenido de los componentes principales es posible determinar las rutas de procesamiento para la obtención de los productos deseados.

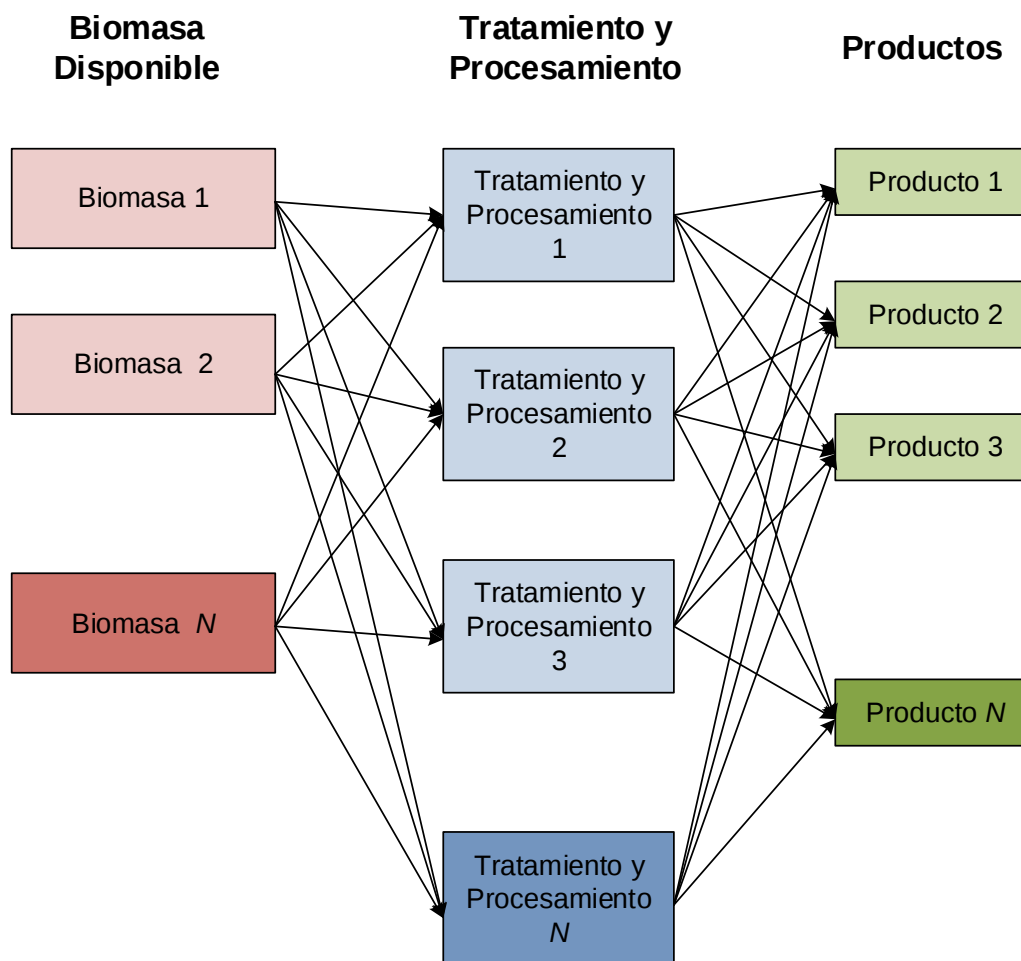


Figura 2.1. Posibles Configuraciones para una Biorefinería.

En este sentido, este trabajo tiene el objetivo de proponer un modelo de programación matemática para determinar la configuración óptima de una biorefinería, optimizando de manera simultánea la selección de las materias primas (que permite elegir diferentes materias primas), la selección de la ruta de procesamiento (optimización de la ruta y los compuestos intermedios) y la selección óptima de los productos de forma que maximice las ganancias

totales y simultáneamente minimice las emisiones netas de gases de efecto invernadero. El problema que se desea abordar se muestra en la Figura 2.2.

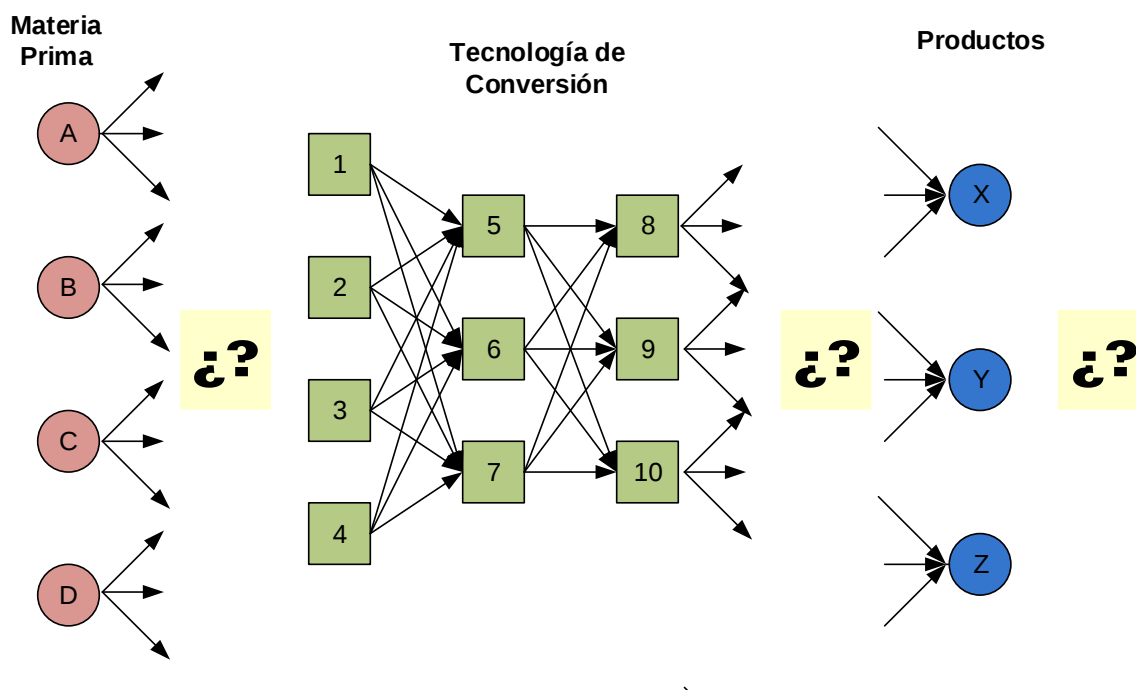


Figura 2.2. Como Proponer la Superestructura para las Configuraciones de Biorrefinería.

A través de la Figura 2.2, es posible determinar la superestructura de acuerdo al caso de estudio que se desee analizar, donde se consideren las alternativas de materias primas disponibles y los productos de alto valor agregado con mayor demanda.

2.2 FORMULACIÓN DE LA SUPERESTRUCTURA DE ESTUDIO

El primer paso es la formulación de la superestructura para identificar el conjunto de posibles configuraciones entre las cuales se pueda determinar la óptima. En este sentido, el planteamiento propuesto por Pham y El-Halwagi (2012) es utilizado como base para este caso de estudio. Tomando en cuenta lo anterior, primero se identifica y caracteriza la biomasa que se utilizará como materia prima, después, se identifican los productos que se desean obtener. En este punto, hay varios productos que pueden obtenerse de la materia prima a través de diferentes reacciones químicas; además, hay varios componentes que pueden ser

utilizados para producir el producto deseado a través de diversas alternativas de reacción. El principal problema se basa en identificar la interconexión entre estos compuestos a través de las diferentes rutas químicas de procesamiento. Por lo tanto, el enfoque de esta metodología consiste en la síntesis de la biomasa, donde sea posible identificar todos los productos intermedios y sus correspondientes tecnologías de conversión.

La segunda etapa consiste en determinar las etapas anteriores del producto generado; donde para cierto producto final, se determinan los compuestos anteriores necesarios, así como sus correspondientes tecnologías. El siguiente paso corresponde al enlace de los compuestos intermedios obtenidos, considerando las etapas de procesamiento anteriores y consecuentes. El paso final para la generación de la superestructura es la intercepción de dos compuestos intermedios obtenidos a través del conjunto de las tecnologías de conversión disponibles para conectar estos compuestos. De acuerdo con lo anterior, es posible formular la superestructura mostrada en la Figura 2.3 para un caso de estudio en específico.

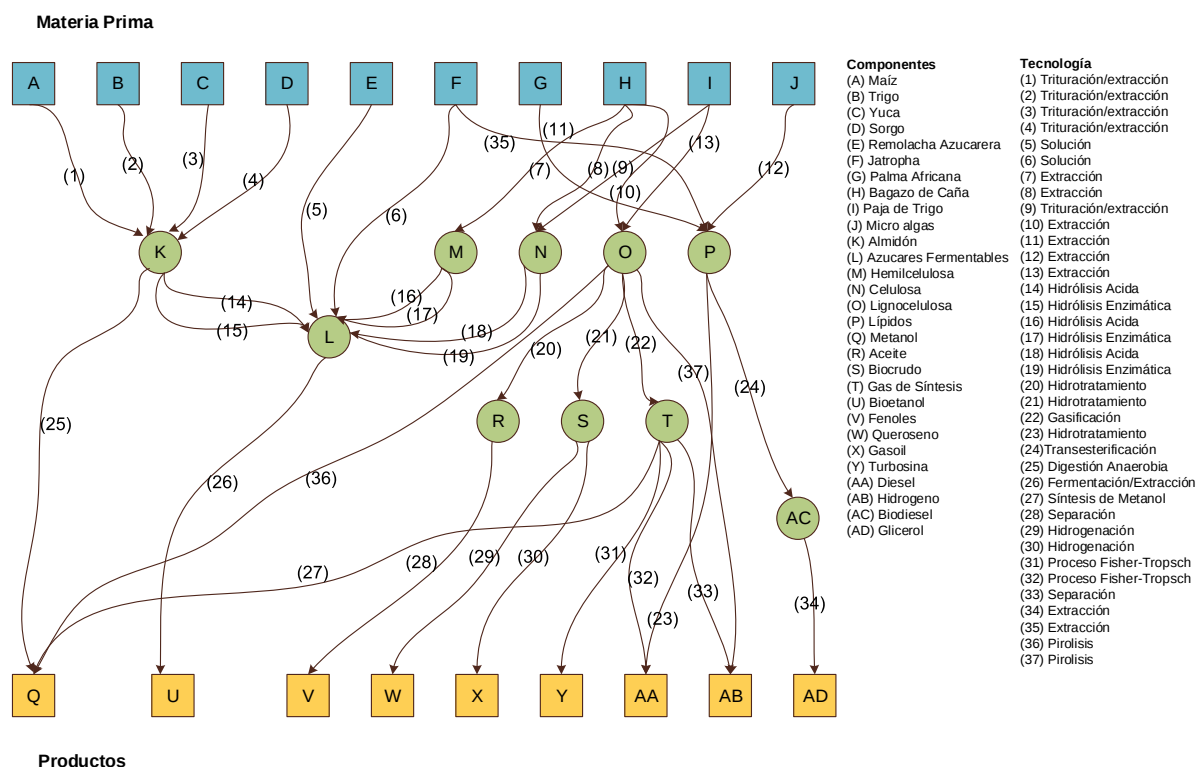


Figura 2.3. Ejemplo para Determinar las Opciones de Configuración de una Biorefinería.

En la Figura 2.3 es posible observar que hay varias posibilidades para la configuración de biorefinería, sin embargo a simple vista no es posible identificar la ruta con el menor costo. Además, la solución con el mínimo costo puede no corresponder a la solución con el menor impacto ambiental o las mínimas emisiones de GEI (tomando en cuenta que este es uno de los propósitos para el uso de biocombustibles). Asimismo, la solución con el mínimo costo puede no corresponder a la solución con el mínimo número de etapas de procesamiento; tomando en cuenta que el número de etapas de procesamiento está directamente relacionado con la seguridad de una determinada configuración, debido a que el uso adicional de etapas de procesamiento requiere de la adición de una mayor cantidad de unidades de procesamiento.

2.3 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN

De acuerdo con la superestructura generada para el caso de estudio en específico, se realiza la formulación del modelo matemático donde son definidos los siguientes grupos de índices, el índice i representa cualquier componente procedente del componente j en la superestructura. Por lo tanto, para obtener cualquier componente j , es necesario considerar que este procede de un componente i . Además, a través de la superestructura generada es posible observar que para obtener cada componente i y j se cuentan diferentes alternativas de procesamiento (como se muestra en la Figura 2.4). Por lo tanto, se toma en cuenta el índice t , el cual es utilizado para representar las diferentes rutas químicas de procesamiento como enlace entre cualquier par de componentes.

De acuerdo con la Figura 2.4 y la superestructura mostrada en la Figura 2.3, el modelo matemático de optimización para determinar la configuración óptima de una biorefinería es formulado de la siguiente manera:

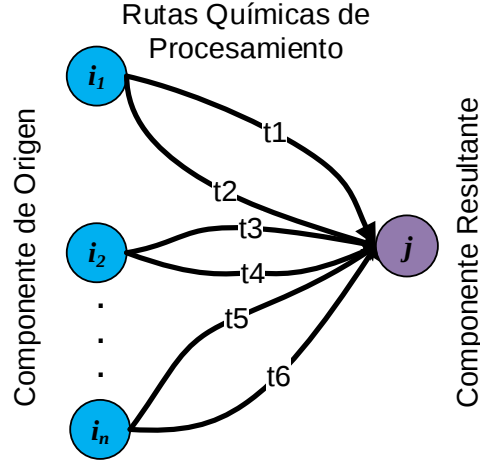


Figura 2.4. Rutas Químicas de Procesamiento para la Conexión entre Dos Componentes

La siguiente relación lógica indica que cuando el compuesto j es seleccionado para aparecer en la ruta óptima, por lo tanto una tecnología t_j es seleccionada para producirlo. Esto es modelado a través de la siguiente variable binaria:

$$y_j = \sum_{t_j \in T_j} z_{j,t_j}, \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock} \quad (2.1)$$

En la ecuación anterior, y_j representa la variable binaria utilizada para modelar la existencia del componente j en la ruta óptima (si y_j toma el valor de uno, el componente j existe, y cuando toma el valor de cero el componente no está presente en la ruta óptima); la variable binaria $z_{j,t}$ es utilizada para seleccionar la tecnología t_j para la producción del componente j (cuando la variable binaria $z_{j,t}$ toma el valor de uno, es utilizada la tecnología t_j para la producción del componente j ; mientras que cuando la variable binaria toma el valor de cero no es seleccionada ninguna ruta para la producción del componente j).

Cuando es seleccionada una tecnología t_j para la producción del componente j a partir de i , entonces se requiere de una restricción adicional para determinar que el componente proviene del componente i , por lo tanto debe existir en la ruta óptima, esto se modela de la siguiente forma:

$$(1 - z_{j,t_j}) + y_i \geq 1, \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock}, \forall t_j \in T_j \quad (2.2)$$

Si el componente j existe en la ruta óptima, el flujo asociado debe ser mayor a cero así como un costo y un impacto ambiental, y por lo tanto debe seleccionarse el componente i del que proviene para la producción del componente j a través de la ruta de procesamiento t_j .

La existencia del componente j en la ruta óptima es modelada a través de la siguiente ecuación:

$$f_j \leq M_{f_i}^{\max} y_j, \quad j \in J \quad (2.3)$$

Cuando cierto componente j de un grupo de materias primas es seleccionado como elemento de la configuración óptima (es decir, la variable binaria y_j tomó el valor de uno), el flujo del componente seleccionado debe cumplir con los límites máximos y mínimos dados (es decir, $M_{f_j}^{\min}$ y $M_{f_j}^{\max}$), además, es asociado un costo unitario (M_{Cost_j}) y un impacto ambiental (M_{EI_j}). Por otro lado, si el componente j no es seleccionado (es decir, la variable y_j tomo el valor de cero), el flujo, el costo y el impacto ambiental asociados son iguales a cero. Esto es modelado a través de la siguiente disyunción:

$$\left[\begin{array}{c} Y_j \\ M_{f_j}^{\min} \leq f_j \leq M_{f_j}^{\max} \\ Cost_j = M_{Cost_j} \\ EI_j = M_{EI_j} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} \neg Y_j \\ f_j = 0 \\ Cost_j = 0 \\ EI_j = 0 \end{array} \right], \quad \forall j \in J, j = \text{feedstock}$$

Donde la variable Booleana Y_j es efectiva cuando la correspondiente variable binaria y_j toma el valor de uno, en este caso se es asignado un flujo, un costo y un impacto ambiental. Sin embargo, la variable Booleana Y_j no es efectiva cuando la variable binaria y_j asociada toma el valor de cero, por lo tanto el flujo, costo e impacto ambiental son iguales a cero. Estas ecuaciones lógicas son modeladas algebraicamente de la siguiente forma:

Si el componente j forma parte de la configuración óptima, entonces el flujo para este componente debe ser mayor que cero y menor que un límite máximo:

$$M_{f_j}^{\min} y_j \leq f_j \leq M_{f_j}^{\max} y_j, \quad \forall j \in J, j = \text{feedstock} \quad (2.4)$$

De forma similar, los costos unitarios para el componente j son calculados de la siguiente forma:

$$Cost_j = M_{Cost_j} y_j, \quad \forall j \in J, j = feedstock \quad (2.5)$$

Finalmente, se calcula el impacto ambiental unitario por el procesamiento del componente j , a través de la siguiente expresión:

$$EI_j = M_{EI_j} y_j, \quad \forall j \in J, j = feedstock \quad (2.6)$$

Los datos correspondientes a los costos unitarios (M_{Cost_j}) y el impacto ambiental unitario (M_{EI_j}) para cada componente pueden ser obtenidos a partir de datos reportados o experimentales.

Para el caso de componentes intermedios, cuando se selecciona la ruta química t_j , a esta tecnología se le ha asociado un factor de conversión ($\alpha_{i,t_j}(\mathbf{O}_{t_j})$) para obtener j , incluyendo el correspondiente costo ($Cost_j$) y el impacto ambiental (EI_j). Estos términos, dependen del vector de operación ($\mathbf{O}_{t_j}$) para cada tecnología t_j . En otras palabras, cuando el componente intermedio j no está presente en la configuración óptima, entonces el flujo, costo e impacto ambiental deben ser cero. Este criterio, es modelado a través de la siguiente disyunción, esta expresión es válida sólo para los componentes intermedios.

$$\bigvee_{t_j \in T_j} \left[\begin{array}{l} Z_{j,t_j} \\ f_j = \alpha_{i,t_j}(\mathbf{O}_{t_j}) f_i, \text{ } i \text{ preceds } j \text{ through } t_j \\ Cost_j = c_{t_j}(\mathbf{O}_{t_j}) f_j \\ EI_j = ei_j(\mathbf{O}_{t_j}) f_j \end{array} \right], \quad \forall j \in J, j \neq feedstock$$

La disyunción anterior puede ser reformulada como un problema algebraico utilizando los siguientes criterios. En primer lugar, la variable Booleana (Z_{j,t_j}) es reformulada como una variable binaria (z_{j,t_j}). Esto significa, que cuando la variable Booleana es efectiva, la variable binaria asociada deber ser uno, y las ecuaciones de la

disyunción deben ser aplicables; en caso contrario, cuando la variable Booleana no es efectiva, la variable binaria debe ser cero y la formulación anterior no es aplicable.

Cuando la tecnología es seleccionada para producir un componente intermedio j que forma parte de la ruta óptima, se le asocia un flujo, costo e impacto ambiental, el cual debe ser determinado de acuerdo a las condiciones de operación ($\mathbf{O}_{t_j}$), esto es optimizado a través de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 f_j &\leq \alpha_{i,t_j}(\mathbf{O}_{t_j}) f_i + M_{f_j} (1 - z_{j,t_j}), \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock}, i \text{ preceds } j \text{ through } t_j \\
 f_j &\geq \alpha_{i,t_j}(\mathbf{O}_{t_j}) f_i - M_{f_j} (1 - z_{j,t_j}), \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock}, i \text{ preceds } j \text{ through } t_j \\
 \text{Cost}_j &\leq c_{t_j}(\mathbf{O}_{t_j}) f_j + M_{\text{Cost}_j} (1 - z_{j,t_j}), \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock} \\
 \text{Cost}_j &\geq c_{t_j}(\mathbf{O}_{t_j}) f_j - M_{\text{Cost}_j} (1 - z_{j,t_j}), \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock} \\
 EI_j &\leq ei_j(\mathbf{O}_{t_j}) f_j + M_{EI_j} (1 - z_{j,t_j}), \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock} \\
 EI_j &\geq ei_j(\mathbf{O}_{t_j}) f_j - M_{EI_j} (1 - z_{j,t_j}), \quad \forall j \in J, j \neq \text{feedstock}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

En las expresiones anteriores, M_{f_j} , M_{Cost_j} y M_{EI_j} representan los límites máximos para cada expresión, con el fin de evitar infactibilidades para el caso cuando la variable binaria (y_{j,t_j}) toma el valor de cero. Cuando la variable binaria toma el valor de uno, las expresiones son aplicadas debido a que la relajación es eliminada. Además, en las expresiones anteriores, el factor de conversión ($\alpha_{i,t_j}(\mathbf{O}_{t_j})$), el costo unitario ($c_{t_j}(\mathbf{O}_{t_j})$) y el impacto ambiental unitario ($ei_j(\mathbf{O}_{t_j})$) dependen de las condiciones de operación para cada tecnología. Observe que las condiciones de operación deben ser optimizadas simultáneamente debido a las interacciones entre las diferentes tecnologías de procesamiento.

La restricción para la demanda de productos es formulada a partir de la siguiente expresión:

$$f_j \leq Demand_j, \quad j \in j_{products} \quad (2.8)$$

La cantidad máxima de materia prima para procesamiento de la materia disponible debe estar de acuerdo con el caso de estudio en específico, esto es aplicado a través de la siguiente expresión:

$$f_j \leq Availab_j, \quad j \in j_{feedstock} \quad (2.9)$$

Para considerar el principio de intensificación de procesos, el modelo propuesto está basado en una aproximación de optimización multi-objetivo. Por lo tanto, la función objetivo radica en la maximización de las ganancias totales, la minimización del impacto ambiental y la minimización de las etapas de procesamiento, estos objetivos son formulados a continuación.

Primero, los costos totales están compuestos de la suma de los costos para todos los componentes presentes en la configuración óptima, incluyendo los costos de las materias primas, así como el costo de las etapas de procesamiento, esto es modelado a través de la siguiente ecuación:

$$TotCost = H_Y \sum_{j \in J} Cost_j \quad (2.10)$$

Las ventas para los productos obtenidos son calculadas a partir de la siguiente expresión:

$$Sales = H_Y \sum_{j \in j_{products}} Price_j \times f_j \quad (2.11)$$

Finalmente, las ganancias totales son determinadas considerando las ventas menos los costos, de la siguiente forma:

$$Profit = Sales - TotCost \quad (2.12)$$

Donde el costo ($Cost_j$) representa el costo total de producción de j , $Price_j$ es el precio unitario para el producto j y $Profit$ es la ganancia total.

El impacto ambiental total para la configuración óptima es calculado a través de la siguiente expresión:

$$TotEI = \sum_{j \in J} EI_j \quad (2.13)$$

Donde EI_j es el impacto ambiental total por la producción del componente j .

Finalmente, para la solución del problema de optimización multi-objetivo puede ser utilizado el Método *Constraint* (Diwekar, 2006), donde es posible obtener las curvas Pareto para los objetivos considerados.

2.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Para mostrar la aplicabilidad del modelo matemático de optimización propuesto para encontrar la configuración óptima de una biorefinería, se presenta el siguiente caso de estudio, donde se proponen diferentes escenarios (considerando diferentes funciones objetivo) de forma que sea posible englobar los aspectos económicos y ambientales. El caso de estudio considera la disponibilidad de diferentes materias primas, rutas de procesamiento y la producción de numerosos productos de alto valor agregado, como se muestra en la Figura 2.3, y los datos usados dentro del modelo se muestran en la Tabla 2.1, en donde se muestra los valores de las eficiencias para cada etapa de procesamiento de acuerdo a la Figura 2.3, estos valores son reportados en la literatura (www.sugarcanebioethanol.org/es/download/resumo_executivo.pdf 2012, BIOENERCEL 2011, López-Gerardo 2004, Oliva-Domínguez 2003). Estos valores de eficiencias están expresados en términos de kg de producto obtenido por kg de materia prima, el costo de cada etapa de procesamiento esta expresado en términos de \$USD por kg producido, y las emisiones de GEI generadas por cada etapa de procesamiento en unidades de CO₂ eq, por kg de producto producido. El modelo propuesto toma en cuenta las emisiones de GEI por el uso de la materia prima, producción y obtención del bio-productos. Los datos de las materias primas disponibles son considerados como una alimentación en la superestructura, así los costos y emisiones por kg, los cuales son mostrados en la Tabla 2.2, y representan las materias primas más importantes en México para la obtención de biocombustibles debido a la excelente composición química donde es posible extraer azúcares fermentables o lípidos para la obtención de biocombustibles o algunos otros bio-productos de alto valor agregado, estos datos son reportado por SENER 2006.

Tabla 2.1. Datos para las Etapas de Procesamiento para el Caso de Estudio.

No.	Tecnología	Eficiencia (kg de producto/kg material prima)	Costo (US\$/kg)	Emisiones (kg CO ₂ eq./kg)
1	Trituración/Extracción	0.626	0.12	0.094
2	Trituración/Extracción	0.693	0.14	0.068
3	Trituración/Extracción	0.35	0.125	0.087
4	Trituración/Extracción	0.63	0.108	0.0908
5	Solución	0.877	0.155	0.075
6	Solución	0.55	0.098	0.088
7	Extracción	0.38	0.125	0.065
8	Extracción	0.7	0.15	0.059
9	Trituración/Extracción	0.5123	0.083	0.083
10	Extracción	0.2411	0.0775	0.079
11	Extracción	0.2067	0.155	0.085
12	Extracción	0.534	0.085	0.065
13	Extracción	0.21	0.0745	0.078
14	Hidrolisis Acida	0.65	0.141	0.097
15	Hidrolisis Enzimática	0.65	0.1905	0.086
16	Hidrolisis Acida	0.906	0.1687	0.075
17	Hidrolisis Enzimática	0.88	0.0831	0.082
18	Hidrolisis Acida	0.372	0.0734	0.097
19	Hidrolisis Enzimática	0.468	0.0857	0.085
20	Hidrotratamiento	0.243	0.1514	0.091
21	Hidrotratamiento	0.352	0.1628	0.086
22	Gasificación	0.8	0.1532	0.096
23	Hidrotratamiento	0.6	0.1428	0.078
24	Transesterificación	0.52	0.1638	0.093
25	Digestión Anaeróbica	0.25	0.0731	0.073
26	Fermentación/Extracción	0.332	0.0982	0.098
27	Síntesis Metanol	0.412	0.0836	0.083
28	Separación	0.544	0.1731	0.091
29	Hidrogenación	0.39	0.097	0.092
30	Hidrogenación	0.438	0.0832	0.078
31	Proceso Fisher-Tropsch	0.63	0.0732	0.073
32	Proceso Fisher-Tropsch	0.59	0.1673	0.067
33	Separación	0.46	0.138	0.090
34	Extracción	0.52	0.1438	0.087
35	Extracción	0.39	0.158	0.080
36	Pirolisis	0.487	0.1438	0.063
37	Pirolisis	0.342	0.0967	0.098

Sin embargo, la Jatrofa es un cultivo poco conocido en México, por lo cual los cultivos de esta materia prima son casi nulos. Pero debido a que es una de las especies con

mayor contenido de azúcares para la producción de biocombustibles, actualmente se están analizando en México las regiones con un importante potencial para el cultivo de esta especie.

La Tabla 2.3 muestra los datos para los productos considerados de acuerdo a la Figura 2.3, en esta tabla se incluyen los datos de la demanda, los precios de venta y las emisiones de GEI asociados por el uso del bio-producto, estos valores fueron reportado en la literatura (SENER 2006, Oliva-Domínguez 2003, Expósito-Fernández 2008). El caso de estudio propuesto está compuesto de 158 variables continuas, 66 variables binarias y 409 restricciones; el modelo fue programado en el software GAMS utilizado el resolutor CPLEX para resolver el problema MILP.

Tabla 2.2. Disponibilidad de las Principales Materias Primas y su Costo.

Materia Prima	Disponibilidad (kg/día)	Costo (US\$/kg)	Emisión GEI (kg)
Maíz	80,000,000	0.0878	-0.3835
Trigo	35,000,000	0.0912	-0.4165
Yuca	1,000,000	0.0827	-0.2465
Sorgo	25,000,000	0.0914	-0.2191
Remolacha Azucarera	1,500,000	0.096	-0.2164
Jatrofa	7,500,000	0.0931	-0.4273
Palma Africana	1,800,000	0.08205	-0.3561
Bagazo de Caña	27,500,000	0.0907	-0.4082
Paja de Trigo	2,000,000	0.0769	-0.2794
Micro Algas	1,250,000	0.0825	-0.1878

Tabla 2.3. Demanda de los Productos, Costo y Emisiones de GEI.

Productos	Demanda (kg/día)	Precio (US\$/kg)	Emisión GEI (kg CO ₂ eq./kg producto)
Metanol	90,000	0.87	3.239
Bioetanol	150,000	0.523	1.375
Fenol	45,000	0.594	2.095
Queroseno	43,000	0.634	2.808
Gasóleo	40,000	0.692	2.289
Turbosina	120,000	0.769	2.458
Biodiesel	175,000	0.79	2.346
Hidrogeno	30,000	0.818	3.239
Glicerol	15,000	0.668	0.1

2.4.1 Escenario A (Solución Económica)

Este escenario corresponde a la mejor solución económica sin considerar alguna demanda específica para los productos determinados (considerando solamente el límite superior para la demanda de productos). La solución óptima se muestra en la Figura 2.5. En la solución óptima se encuentra que la mejor ruta es la obtención de diésel a partir de microalgas debido al alto contenido de lípidos en las microalgas y la alta eficiencia de procesamiento correspondiente, esta solución sólo selecciona la producción de un producto (biodiésel). Un punto a considerar es que en este escenario el modelo sólo considera la maximización de la ganancia sin ninguna restricción para satisfacer la demanda de los productos considerados en la superestructura.

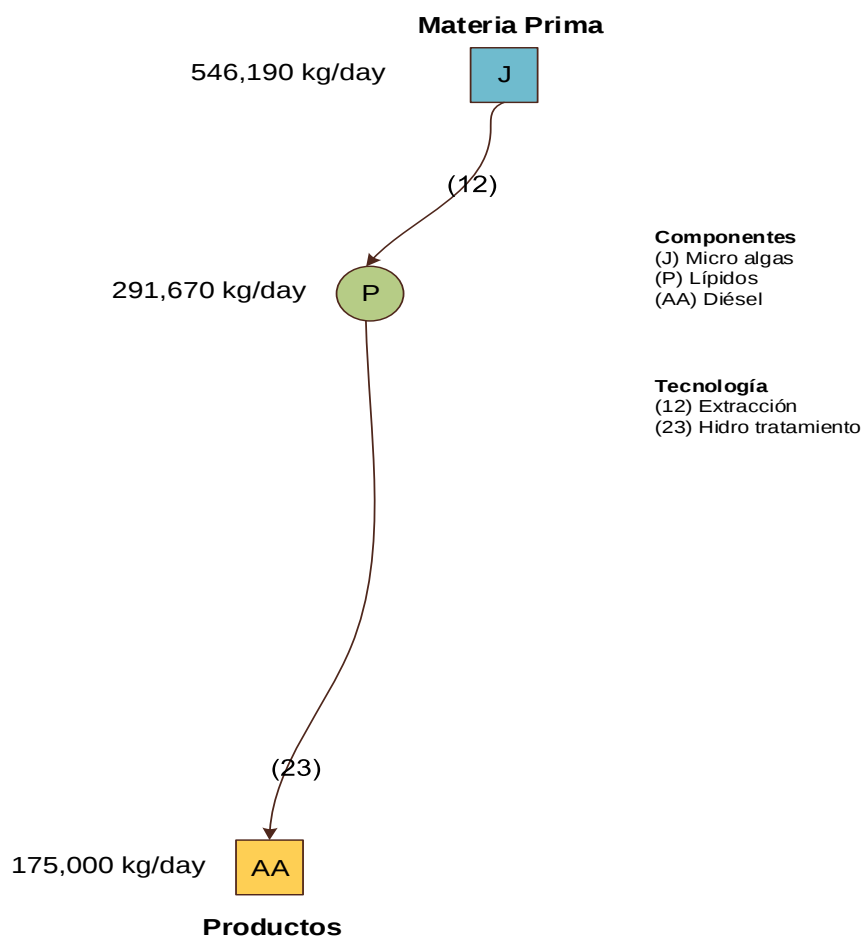


Figura 2.5. Ruta de Procesamiento Óptima para el Escenario A.

Observe que en la Figura 2.5 se requiere de 546,190 kg de micro algas por día para producir 175,000 kg de diésel por día; también observe que la demanda del biodiesel está completamente satisfecha con esta solución económica. La solución óptima tiene una ganancia neta de \$17,638,614.74 US\$/año, estas ganancias representa la diferencia entre las ventas totales y los costos totales de producción; en cuanto a las emisiones de GEI netas asociadas son de 1.8139×10^8 kg CO₂ equiv./año tomando en cuenta el CO₂ capturado en el crecimiento de las micro algas, el CO₂ producido en las etapas de procesamiento y el CO₂ producido en la combustión del biodiesel.

Además, se realizó un análisis para la reducción de las emisiones de GEI asociadas a la ruta de procesamiento encontrada, este análisis se realizó a partir de la construcción de una curva Pareto, la cual se muestra en la Figura 2.6, donde el problema se resuelve mediante el método de *Constraint* (ver Diwekar, 2006), donde se consideran la maximización de la ganancia neta y la minimización de las emisiones de GEI asociadas; en esta figura se observa que las ganancias netas disminuyen cuando disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero y la ruta de procesamiento encontrada permanece constante.

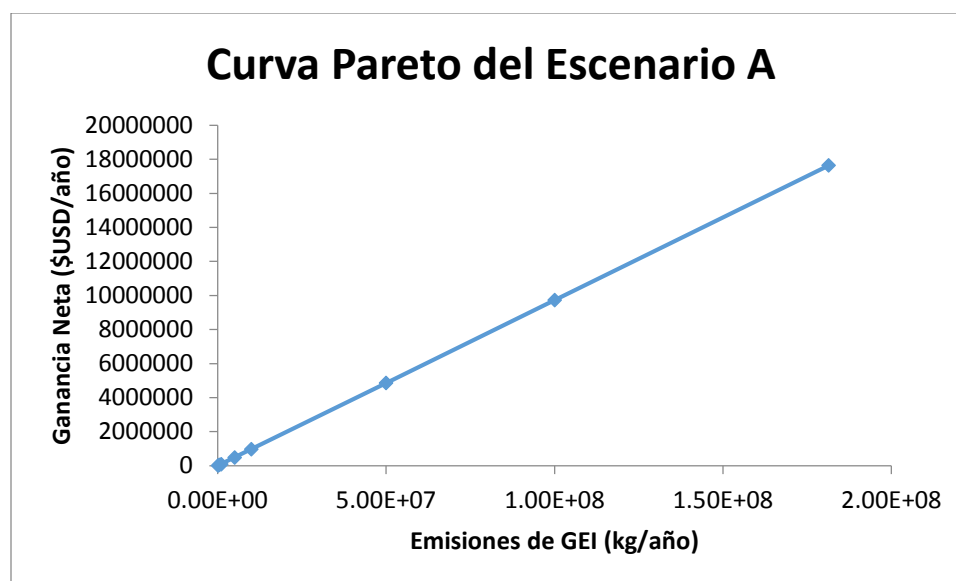


Figura 2.6. Curva Pareto del Escenario A.

2.4.2 Escenario B (Producción de Bioetanol)

Para este escenario se consideran los mismos valores que el escenario A, pero se propone que la demanda del bioetanol tiene que estar totalmente satisfecha (es decir, la producción de bioetanol debe ser 150,000 kg/día). En la Figura 2.7 se muestra la ruta de procesamiento óptima para la producción de bioetanol y además se muestra que también es posible la producción de biodiesel. Los valores óptimos para la ganancia neta y el perfil de las emisiones de GEI son 1,170,988.55 US\$/año y 2.732×10^8 kg/año, respectivamente.

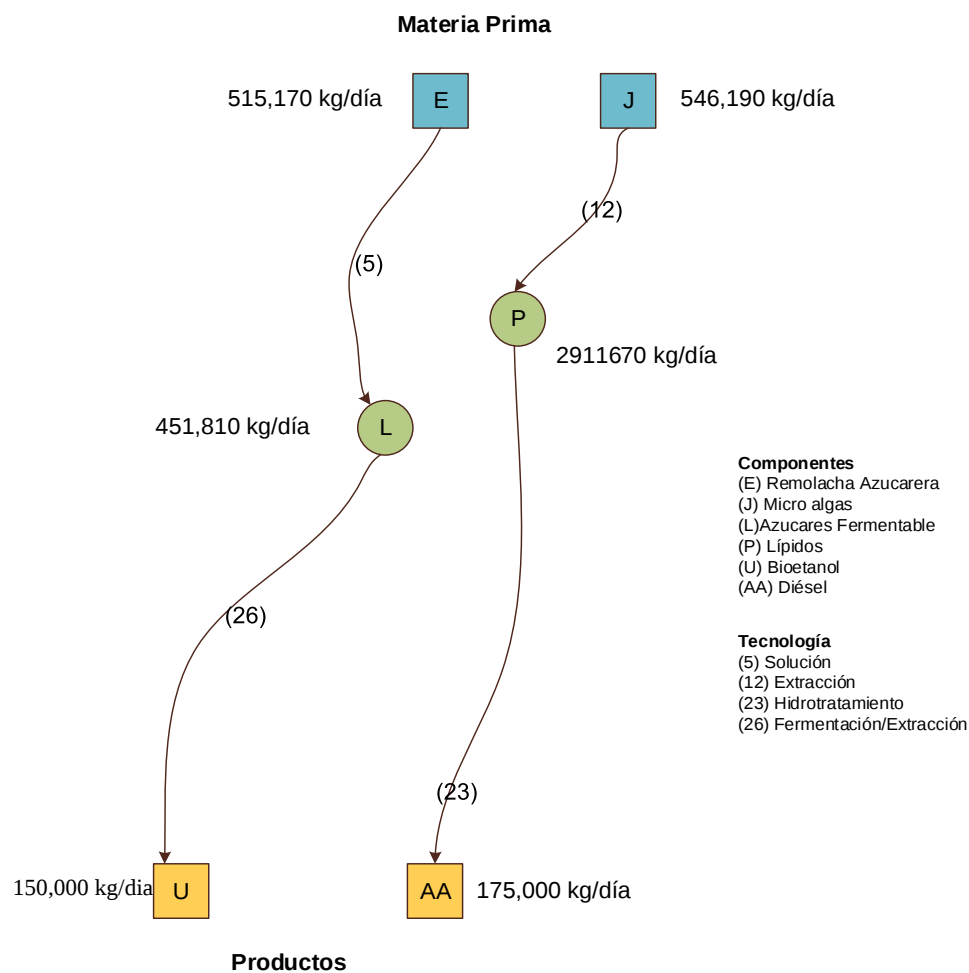


Figura 2.7. Ruta de Procesamiento Óptima para el Escenario B.

En ese sentido, en la Figura 2.8 se muestra la curva Pareto correspondiente al escenario B donde se muestran los dos objetivos, la ganancia y las emisiones de GEI; en esta

curva Pareto se observa que las ganancias disminuyen cuando se reducen las emisiones de GEI, y esto provoca una disminución en la producción de biodiesel.

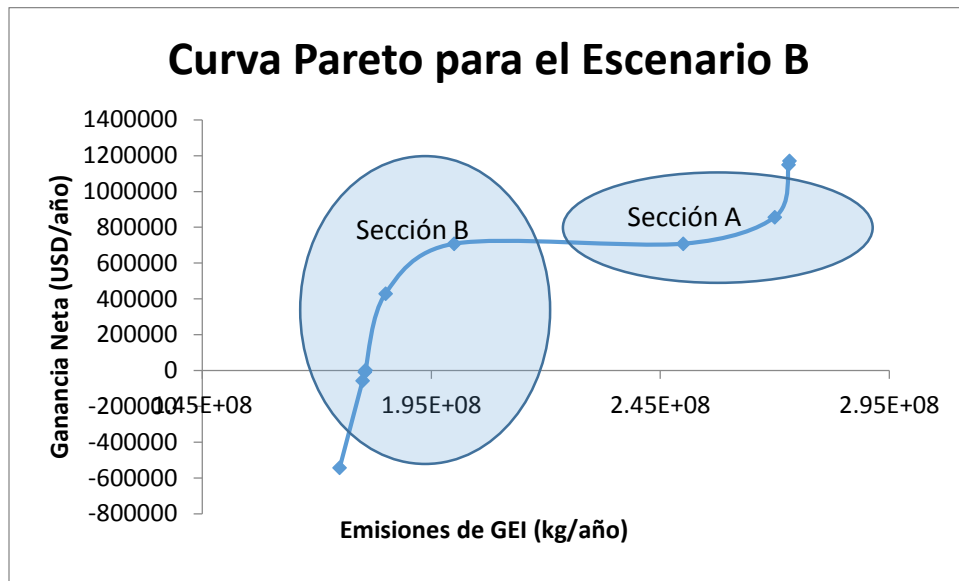


Figura 2.8. Curva Pareto de las Ganancias Versus Emisiones de GEI para el Escenario B.

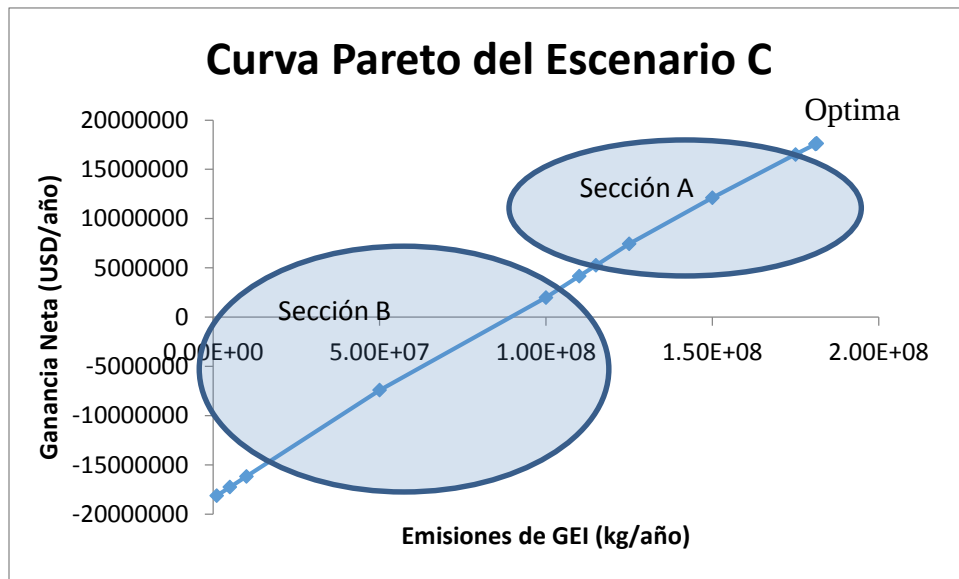


Figura 2.9. Curva Pareto para el Escenario C.

2.4.3 Escenario C (Producción de Biodiesel)

Al igual que en los escenarios analizados anteriormente para este caso corresponden a los mismos valores del escenario A; sin embargo, se establece que la demanda del biodiesel se satisfacerse completamente. La ruta de procesamiento óptima encontrada es la misma que la que se muestra en la Figura 2.5 y los valores óptimos para la ganancia neta y las emisiones de GEI son 17,638,614.74 USD/año y 1.8139×10^8 kg/año, respectivamente.

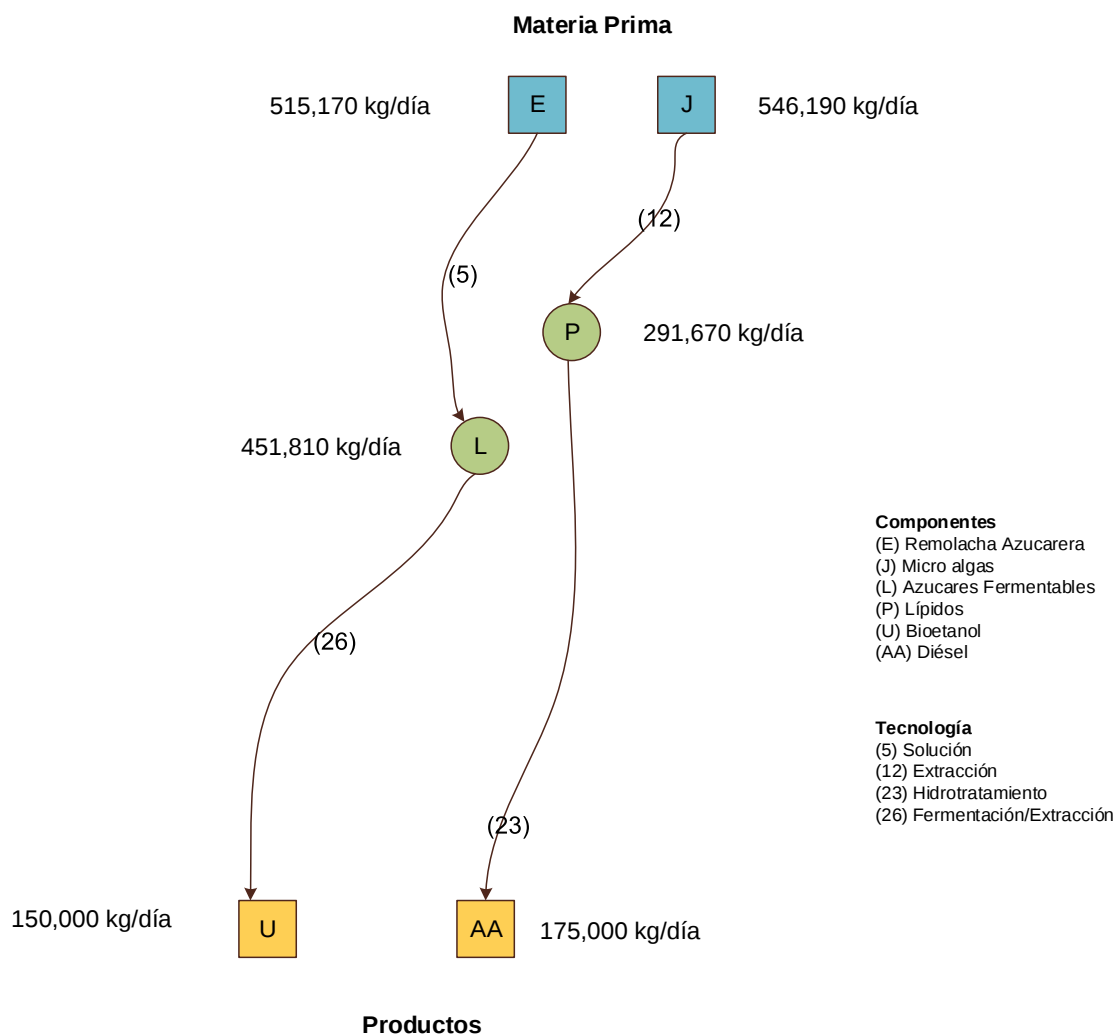


Figura 2.10. Configuración Óptima para el Escenario D.

Por lo tanto, en la Figura 2.9 se muestra la curva de Pareto para este escenario C; donde se observa una sección con una ganancia neta positiva (que corresponde a la configuración que se muestra en la Figura 2.5); sin embargo, también se muestra una sección

con un perfil de ganancias negativo donde la configuración cambia para disminuir las emisiones de GEI.

2.4.4 Escenario D (Producción de Bioetanol y Biodiesel)

Para la solución de este escenario se establece que deben satisfacerse completamente las demandas de bioetanol y biodiesel del caso de estudio analizado. En la Figura 2.10 se muestra la configuración óptima encontrada para la producción de bioetanol y biodiesel, la cual presenta una ganancia de 1,170,988.55 US\$/año y un perfil de emisiones de GEI de 2.7323×10^8 kg/año.

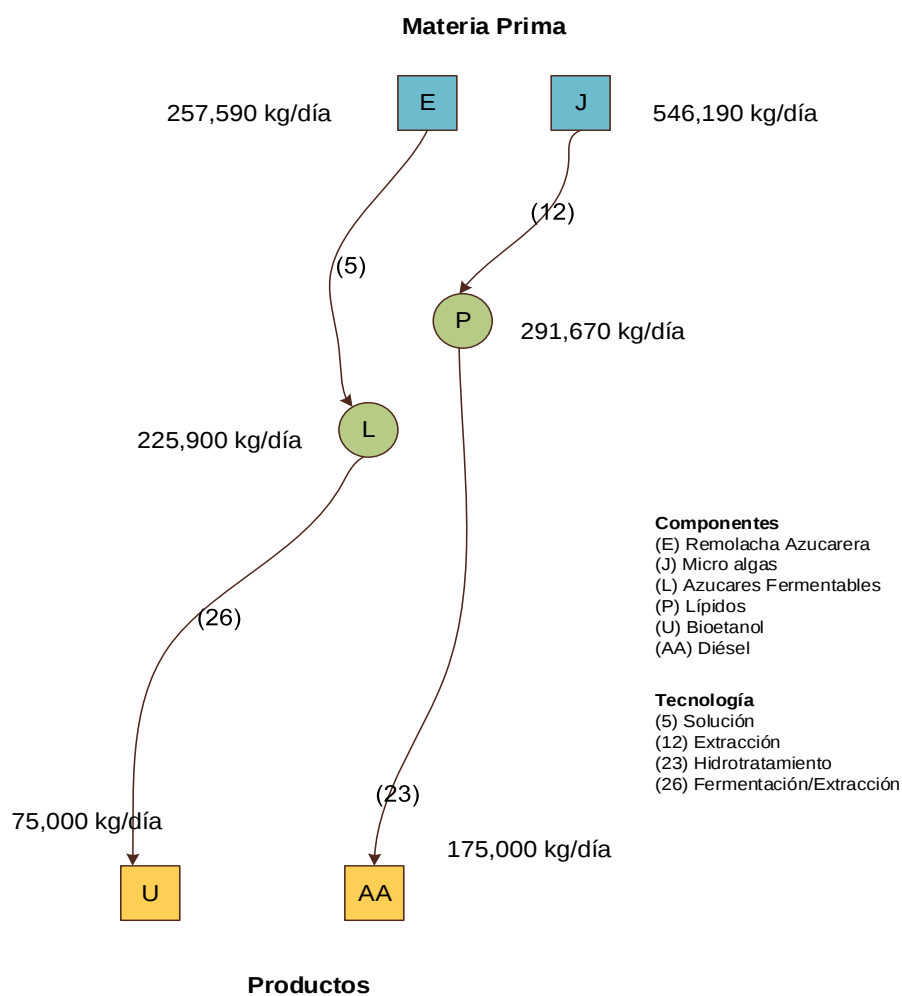


Figura 2.11. Configuración Óptima para el Escenario E.

2.4.5 Escenario E (Producción de 50% de la demanda de Bioetanol y 100% de la demanda de Biodiesel)

Finalmente se analizaron algunos escenarios alternos, considerado satisfacer la demanda de productos en diferentes porcentajes. Como ejemplo, en este escenario propone satisfacer un 50% de la demanda total de la demanda de bioetanol y la demanda total de biodiesel (es decir, 75,000 kg/día de bioetanol y 175,000 kg/día de biodiesel). De acuerdo con los criterios anteriores, la configuración óptima encontrada se muestra en la Figura 2.11, la cual presenta una ganancia total de \$9,404,801.65 USD/año y un perfil de emisiones de GEI de 2.2731×10^8 kg/año.

De los resultados anteriores se puede concluir que a través del modelo matemático de optimización pueden ser analizados varios escenarios utilizando el enfoque de optimización propuesto, en el cual es posible tomar en cuenta diferentes perspectivas (es decir, número mínimo de etapas de procesamiento, mínimas emisiones de gases de efecto invernadero y maximización de la ganancia total). Para el caso específico de México, los resultados indican que los principales bioproductos que son más factibles de obtener son el bioetanol y el biodiesel, mientras que las principales materias primas con mayor potencial son micro algas, jatrofa y caña de azúcar.

CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE AGAVE

En el presente Capítulo, se presenta el caso de estudio realizado para la obtención de bioetanol a través del bagazo de agave. El objetivo de esta investigación es proponer un modelo matemático de optimización el cual determine la cadena de suministro óptima para producir bioetanol considerando los residuos de agave de las principales industrias tequileras y las áreas de cultivo correspondientes. A través de los resultados encontrados se pretende determinar la factibilidad tanto económica, ambiental y social de la producción de bioetanol a partir de los residuos agave.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agave es una planta perenne árida que consiste en láminas delgadas llamadas comúnmente pencas alrededor de una piña (o centro de la planta), cuyos principales elementos son agua, azúcar, minerales y fibras. El jugo de esta planta presenta una alta concentración de fructosa y otras propiedades vitamínicas, este se produce naturalmente en el centro de la planta; además, el agave tiene algunas partículas de grasa que producen su distintivo sabor y olor. A partir del uso de esta planta es posible obtener una gran cantidad de productos de agave como agua de miel, papel, textiles, tequila y mezcal. México es una de las áreas con la mayor diversidad de especies de agave en el mundo. Por esta razón, una de las industrias más importantes es la asociada a la producción de tequila y mezcal, donde la planta del agave se utiliza como fuente de azúcares fermentables.

Por denominación de origen, el agave se cultiva principalmente en la parte centro-oeste de México (en los Estados de Jalisco, Guanajuato y Michoacán), y la mayoría de las fábricas asociadas a la industria tequilera se encuentran en esta región. Durante el procesamiento de agave para producir tequila se producen varios residuos lignocelulósicos de agave; estos residuos corresponden tanto a las pencas que se obtienen en las áreas de cultivo ya que actualmente éstos no se utilizan para el proceso del tequila y también hay otros residuos lignocelulósicos procedentes de las fábricas asociadas al procesamiento de las piñas después del proceso de fermentación para la obtención del tequila. Hoy en día, los residuos del agave generados en las regiones de cultivo de agave representan un problema de contaminación considerable porque la biomasa proveniente de las pencas no se utiliza para alguna actividad de interés económico, por lo tanto se considera como desecho. Sin embargo, estos residuos lignocelulósicos pueden ser usados como materia prima para producir varios productos con valor agregado, incluyendo el bioetanol y el combustible sólido. Además, considerando que la actualidad satisfacer las demandas de combustible resulta ser un problema de gran interés, debido a la disminución de las reservas del petróleo a nivel mundial, además considerando el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas. En este sentido, se esperan que los biocombustibles que sean capaces de disminuir el impacto ambiental negativo por el uso de la energía, estos biocombustibles se producen a partir de biomasa y residuos orgánicos con alto contenido de carbono; por ejemplo, el bioetanol es uno de los biocombustibles con mayor producción que pueden ser utilizados como sustitución a la gasolina.

Tomando en cuenta lo anterior, actualmente no se ha presentado un estudio para la cadena de suministro óptimo asociado a la producción de bioetanol a partir de residuos de agave en México. En este caso de estudio se considera un análisis de las etapas de procesamiento para los residuos del agave, las principales fuentes de material lignocelulósico como el que se obtienen de la industrias tequilera, mezcalera y de las principales regiones de cultivo de agave, además, considera de forma particular aspectos que deben ser considerados en la optimización de la cadena de suministro como la ubicación geográfica específica de las principales industrias del tequila en México y un análisis de la capacidad de producción para satisfacer la demanda de bioetanol en México a partir de estos residuos.

Por lo tanto, en este trabajo se propone un modelo de programación matemática para la optimización de la cadena de suministro asociada a la producción de bioetanol a partir de residuos de agave de la industria del tequila en México. El modelo de optimización propuesto toma en cuenta los datos experimentales obtenidos en planta piloto de las etapas de procesamiento para la producción de bioetanol de agave. Finalmente, en este trabajo se presenta un análisis de diferentes escenarios para satisfacer la demanda de bioetanol en México usando los residuos de agave de la industria del tequila en México, el análisis incluye la tierra adicional y el agua necesaria para satisfacer una demanda específica de bioetanol.



Figura 3.1. Esquema del Caso de Estudio para la Optimización de la Cadena de Suministro para la Obtención de Bioetanol a Partir de los Residuos del Agave en México.

3.2 FORMULACIÓN DE LA SUPERESTRUCTURA DE ESTUDIO

El caso de estudio propuesto se basa en la Figura 3.1, la cual muestra las áreas más importantes para el cultivo de agave en México; estos sitios de recolección producen agave que puede ser separado en las hojas (pencas) y centro de la planta (piñas), donde las hojas son transportadas a las plantas de procesamiento distribuidas y centrales, y a las piñas son enviadas a la industria tequilera para su procesamiento. Además, es posible obtener bagazo de la industria tequilera; estos residuos pueden ser transportados a instalaciones de procesamiento para la obtención de bioetanol (las etapas consideradas para este proceso se muestran en la Figura 3.2) donde se realiza la mezcla con el bagazo procedentes de las áreas de cultivo, tal como se representa en la Figura 3.3, donde se muestran las principales fuentes para obtener bagazo de agave representan. La Figura 3.4 muestra los pasos requeridos para transformar la biomasa disponible a bioetanol. Finalmente, el bioetanol obtenido puede ser transportado para el consumo a las principales ciudades de México, que en este caso son los mercados con demanda de biocombustibles.

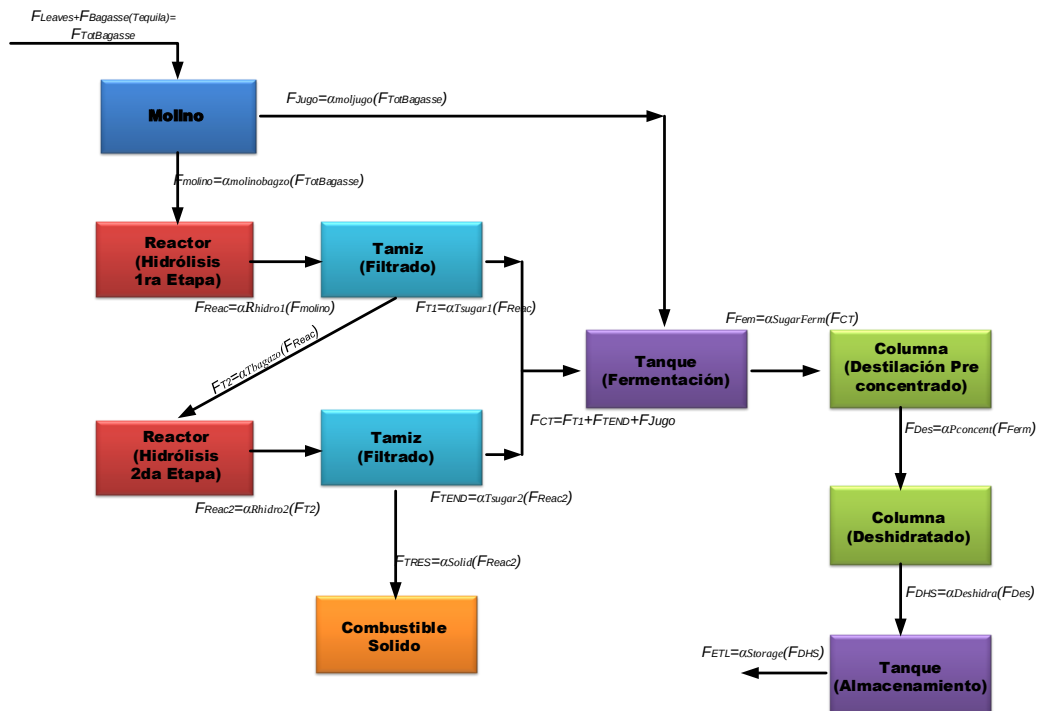


Figura 3.2. Proceso Detallado para la Producción de Bioetanol Dentro de Plantas Distribuidas y Centrales.

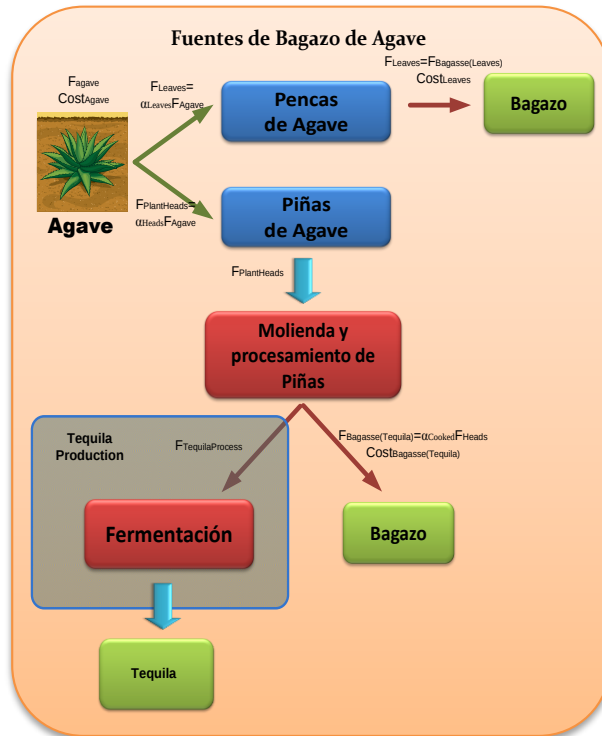


Figura 3.3. Principales Fuentes de Obtención de Bagazo para la Obtención de Bioetanol.

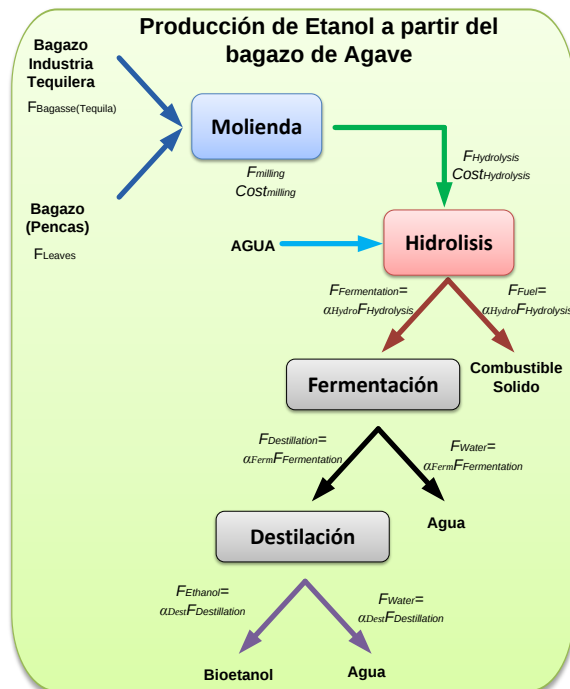


Figura 3.4. Diagrama de las Diferentes Etapas de Procesamiento de la Biomasa para la Obtención de Bioetanol.

Para identificar la distribución de las plantas de procesamiento consideradas, se propone la superestructura que se muestra en la Figura 3.5. En este sentido, en la primera etapa el bagazo de agave procedente de las áreas de cultivo y de la industria tequilera se utiliza como materia prima en las plantas de procesamiento centrales y distribuidas. Estas plantas de procesamiento se basan en la Figura 3.2 para la producción de bioetanol.

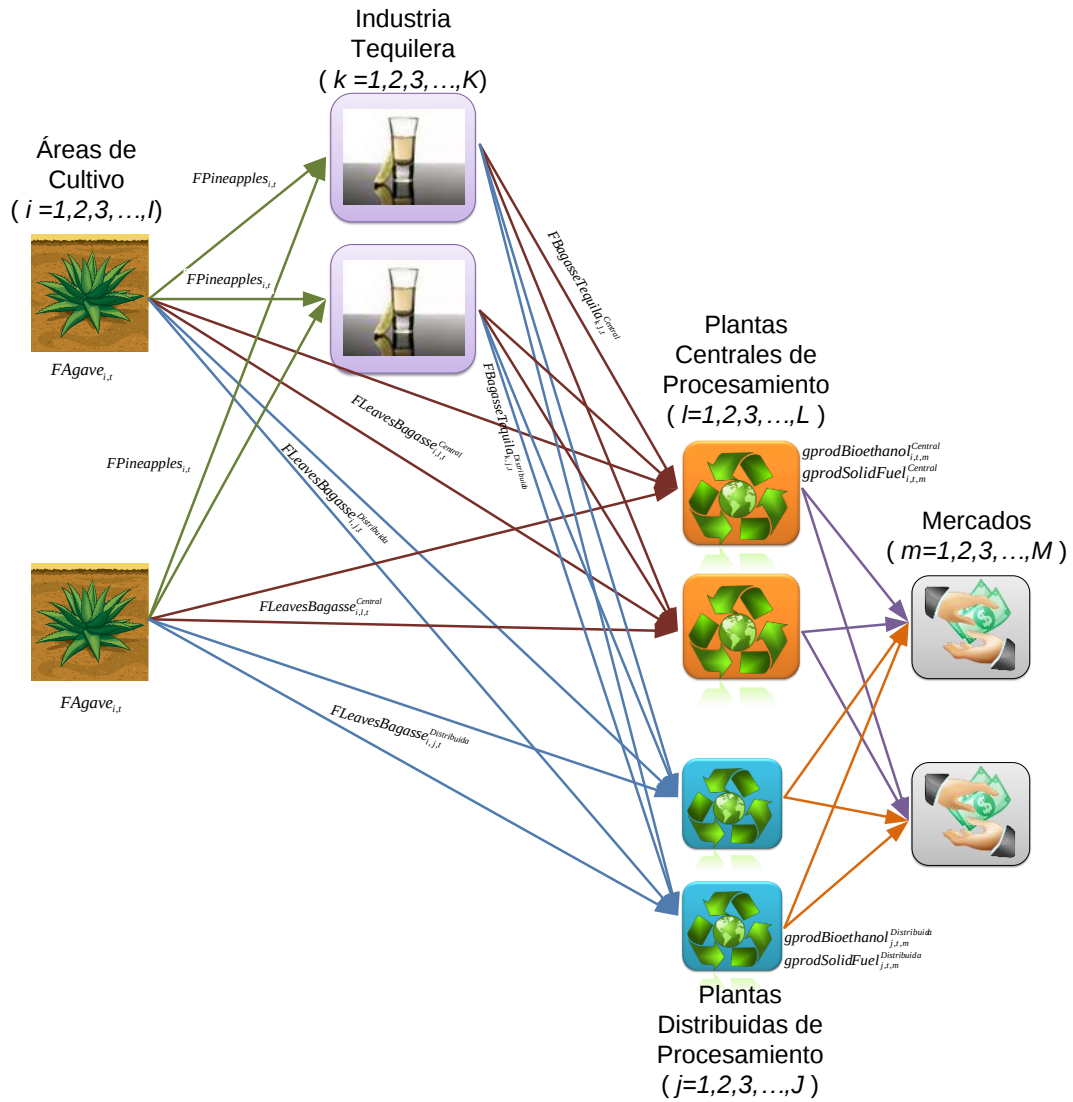


Figura 3.5. Superestructura Propuesta para la Optimización de la Cadena de Suministro Considerando los Residuos del Agave en México.

Las diferencias entre las plantas de procesamiento distribuidas y centrales son la capacidad y la ubicación. En este contexto, las plantas centrales de procesamiento están situadas en zonas estratégicas cerca de las zonas industrializadas donde la capacidad de

producción es mayor y el proceso resulta ser más económico, ya que permite la obtención de mayores volúmenes de bioetanol. Por otro lado, las plantas de procesamiento distribuidas se encuentran cerca de las zonas de cultivo, donde hay menos infraestructura y la capacidad de procesamiento es menor, de esta manera la unidad de costo de procesamiento es mayor (debido a las economías de escala). En este contexto, las plantas procesamiento distribuidas ayudan a reducir los costos de transporte de las materias primas, que es el principal costo involucrado en la cadena de suministro. Sin embargo, en las plantas de procesamiento distribuidas se aumentan el costo de procesamiento. De esta manera, el modelo de optimización debe determinar la mejor alternativa entre estas dos opciones. En este sentido, hay dos funciones de costo, uno que depende por la capacidad de procesamiento (uno para las plantas distribuidas y otro para las plantas centrales) y otro por la ubicación de las plantas de procesamiento.

Tabla 3.1. Eficiencias para el Proceso de Producción de Bioetanol.

Etapas		Eficiencia (kg B/kg A)
Molino	$\alpha_{moljugo}$	0.537
	$\alpha_{molbagazo}$	0.463
Reactor 1ra. Etapa	$\alpha_{Rhidrol}$	1
Tamiz 1ra. Etapa	$\alpha_{Tsugar1}$	0.2
	$\alpha_{Tbagazo}$	0.8
Reactor 2ra. Etapa	$\alpha_{Rhidro2}$	1
Tamiz 1ra. Etapa	$\alpha_{Tsugar2}$	0.52
	α_{Solid}	0.48
Fermentación	$\alpha_{SugarFerm}$	0.39
Columna (Pre-concentrado)	$\alpha_{pconcent}$	0.99
Columna (Deshidratado)	$\alpha_{Deshidra}$	0.99

El proceso de producción para la obtención de bioetanol considera las eficiencias de conversión (α) para cada una de las etapas consideradas en la Figura 3.2; el valor para estas

eficiencias se muestran en la Tabla 3.1, estos valores fueron calculados según datos experimentales obtenidos en planta piloto y representan la relación entre el flujo másico a la salida de material producido entre el flujo másico a la entrada del material procesado en cada etapa del proceso.

3.3 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN

Para encontrar la distribución óptima de plantas distribuidas y centrales, considerando los aspectos económicos, ambientales y sociales, se planteó el siguiente modelo matemático, el cual se formuló considerando la superestructura presentada en la Figura 3.5. Además, se tomó en cuenta el caso de estudio presentado en la Figura 3.1, donde se toman en cuenta las regiones de cultivo de agave, las plantas productoras de tequila, las plantas distribuidas y centrales para el tratamiento de los residuos y finalmente las regiones para la demanda de biocombustibles. Para la producción de biocombustibles, en este caso el bioetanol, se considera el diagrama presentado en la Figura 3.2, el cual establece todas las etapas del proceso de producción, así como los equipos necesarios los cuales deben considerarse para tomar en cuenta los costos de los equipos, los cuales son un aspecto importante dentro de la formulación del modelo. Para la formulación del modelo se consideran los índices i que representan los lugares o regiones de cultivo, j las plantas de tratamiento del bagazo distribuidas, k las plantas productoras de tequila, l las plantas de tratamiento centrales, m los mercados para la venta de los productos obtenidos y t el periodo de tiempo. El modelo formulado consta de las siguientes ecuaciones.

Balance de materia en las regiones de cultivo de Agave.

Este balance establece la división de la planta de agave, la cual se divide en piñas que son la materia prima del tequila y pencas, las cuales son desechadas y son la fuente principal de bagazo.

- Para las piñas. Dentro de las regiones de cultivo de agave ($F_{Agave_{i,t}}$) es posible obtener las piñas ($F_{Pineapples_{i,t}}$) para la producción de tequila con una eficiencia (zAH_i), dado por la siguiente ecuación:

$$F_{Agave_{i,t}} \cdot zAL_i = F_{PlantHeads_{i,t}}, \forall i \in I, t \in T \quad (3.1)$$

- Para las pencas. De igual forma, para la obtención de las pencas, las cuales no tienen ningún uso, son fuente para la obtención de bioetanol. Se cuenta con una eficiencia (zAL_i), para la obtención de las pencas dada por la siguiente ecuación:

$$F_{Agave_{i,t}} \cdot zAL_i = F_{TotalLeavesBagasse_{i,t}}, \forall i \in I, t \in T \quad (3.2)$$

Disponibilidad del Agave. La disponibilidad de agave debe ser menor o igual al máximo disponible ($F_{Agave_{i,t}}^{MAX}$):

$$F_{Agave_{i,t}} \leq F_{Agave_{i,t}}^{MAX}, \forall i \in I, t \in T \quad (3.3)$$

Donde $F_{Agave_{i,t}}^{MAX}$ representa el agave máximo disponible en las zonas agrícolas. En este trabajo, el agave máximo disponible en las zonas de cultivo se considera como una variable de optimización, esto es debido a que el modelo propuesto incluye la posibilidad de aumentar el área de cultivo para satisfacer una mayor demanda. Por lo tanto, $F_{Agave_{i,t}}^{MAX}$ es calculado considerando la disponibilidad de agave actual en esa área para cada periodo de tiempo ($F_{Agave_{i,t}}^{CURRENTLY AVAILABLE}$) multiplicado por el posible incremento ($Inc_{i,t}^{Possible increasing}$), esto es modelado de la siguiente forma:

$$F_{Agave_{i,t}}^{MAX} = F_{Agave_{i,t}}^{CURRENTLY AVAILABLE} \left(1 + Inc_{i,t}^{Possible increasing} \right), \forall i \in I, t \in T \quad (3.4)$$

La variable $Inc_{i,t}^{Possible increasing}$ toma el valor de cero en el caso cuando no se considera alguna posibilidad de incremento.

División del flujo procedente de las áreas de cultivo a las plantas distribuidas y centrales. Este flujo representa la división del flujo de bagazo a partir de las pencas en las áreas de cultivo que es enviado a las plantas distribuidas y el flujo de bagazo que es enviado a las plantas centrales

$$F_{TotalLeavesBagasse_{i,t}} = \sum_{j \in J} F_{LeavesBagasse_{i,j,t}}^{Distribuidas} + \sum_{l \in L} F_{LeavesBagasse_{i,l,t}}^{Central} \quad (3.5)$$

, $\forall i \in I, t \in T$

Balance de Masa en Industria Tequilera. Este balance se realiza para determinar el flujo que entra en plantas productoras de tequila, con la finalidad de conocer el flujo de bagazo que puede obtenerse para la producción de bioetanol.

-A la entrada. Este balance se realiza para determinar el flujo que se va a la tequileras ($FPineapples_{i,t}$) a través de la siguiente ecuación:

$$FPineapples_{i,t} = \sum_{k \in K} FPineapples_{i,k,t}^{Tequileras}, \forall i \in I, t \in T \quad (3.6)$$

El flujo total de piñas procedentes de los lugares de cultivo que se procesa en las tequileras ($FTotalPineapples_{k,t}^{Tequileras}$) está dado por la siguiente ecuación:

$$FTotalPineapples_{k,t}^{Tequileras} = \sum_{i \in I} FPineapples_{i,k,t}^{Tequileras}, \forall k \in K, t \in T \quad (3.7)$$

-A la salida. Este balance determina la cantidad de bagazo obtenido por las tequileras ($FTequilaBagasse_{k,t}$), el cual es fuente para la producción de bioetanol, el bagazo se obtiene a través de cierta eficiencia ($zCooked_k$) dado por la siguiente ecuación:

$$FTequilaBagasse_{k,t} = FTotalPineapples_{k,t}^{Tequileras} \cdot zCooked_k, \forall k \in K, t \in T \quad (3.8)$$

Flujo total de bagazo procedente de las tequileras y que es enviado a plantas distribuidas y centrales. Este balance determina el flujo de bagazo procedente de la industria tequilera el cual es dividido a las plantas distribuidas y centrales para la obtención de bioetanol.

$$FTequilaBagasse_{k,t} = \sum_{j \in J} FBagasseTequila_{k,j,t}^{Distribuid} + \sum_{l \in L} FBagasseTequila_{k,l,t}^{Central}, \forall k \in K, t \in T \quad (3.9)$$

Balance en plantas distribuidas. Este balance toma en cuenta el flujo de bagazo procedente de la industria tequilera ($FBagasseTequila_{k,j,t}^{Distribuid}$) y el flujo de bagazo de las áreas de cultivo de agave ($FLeavesBagasse_{i,t}$) que es enviado a las plantas distribuidas para la obtención de bioetanol y bioproductos de alto valor agregado, el cual es determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$FTotalBagasse_{j,t}^{Distributed} = \sum_{k \in K} FBagasseTequila_{k,j,t}^{Distributed} + \sum_{i \in I} FLeavesBagasse_{i,j,t}^{Distributed}, \quad (3.10)$$

$$\forall j \in J, t \in T$$

El flujo total de bagazo en las plantas de procesamiento distribuidas y centrales el flujo considerado para la producción de bioetanol, según el proceso que se muestra en la Figura 3.2. Todos los pasos del proceso consideran los factores de eficiencia ($\alpha step_p^{Plant}$) para cada una de las etapas involucradas, estos valores se muestra en la Tabla 3.1, los cuales se basan en los datos obtenidos de la planta piloto. Las etapas involucradas para la producción de bioetanol se describen en las Ecuaciones 3.11 a 3.24. Debido a que estas ecuaciones son similares para el procesamiento en plantas centrales y distribuidas, estas ecuaciones se agrupan utilizando el índice para ambas instalaciones. De esta manera, el conjunto P representa la unión de los subíndices J y L ($P = J \cup L$). En este sentido, el bagazo de agave es procesado en las plantas de procesamiento para disminuir el tamaño de las partículas a través de un proceso de molienda, ya que se requiere de un tamaño de partícula pequeño para mejorar el proceso de obtención los azúcares fermentables los cuales pueden ser transformados a bioetanol:

$$FTotalBagasse_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Mill_p^{Plant} = FMill_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.11)$$

Por otro lado, durante el proceso de molienda es posible obtener jugos ricos en azúcares, que después pueden ser procesados para producir bioetanol:

$$FTotalBagasse_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Juice_p^{Plant} = FJuice_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.12)$$

Además, el flujo procedente del proceso de molienda es tratado en un reactor de hidrólisis para romper la cadena de la celulosa y la hemicelulosa, a este paso se le asocia un factor de eficiencia para procesar el material lignocelulósico y de esta forma obtener una mezcla de compuestos que pueden ser separados.

$$FMill_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Re actor_p^{Plant} = F Re actor_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.13)$$

Después de la primera etapa de reacción, se separa la mezcla entre los compuestos hidrolizados y no hidrolizadas a través de un filtro, donde la parte hidrolizada es enviada a un tanque de fermentación y la parte no hidrolizada es dirigida a un segundo reactor de

hidrólisis para obtener una mayor cantidad materiales fermentables. La separación después de la primera etapa de reacción se modela a través de las ecuaciones (3.14) y (3.15):

$$F \text{ Reactor}_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha \text{ Filtred} 1_p^{Plant} = F \text{ filtered} 1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.14)$$

$$F \text{ Reactor}_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha \text{ Filtered} 2_p^{Plant} = F \text{ filtered} 2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.15)$$

Se cuenta con otra sección de filtrado para tratar el efluente procedente del segundo reactor de hidrólisis, el material fermentable ($F \text{ Filtered} \text{ Second}_{p,t}^{Plant}$) obtenido de la ecuación (3.17) es enviado al proceso de fermentación y la otra parte se considera como combustible sólido ($F \text{ Fuel} \text{ Solid}_{p,t}^{Plant}$) que representa un subproducto en la producción global de bioetanol y es calculado por la ecuación (3.18):

$$F \text{ filtered} 2_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha \text{ Reactor} 2_p^{Plant} = F \text{ Reactor} 2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.16)$$

$$F \text{ Reactor} 2_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha \text{ Filtered second} 1_p^{Plant} = F \text{ Filtered} \text{ Second}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.17)$$

$$F \text{ Reactor} 2_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha \text{ Filtered} \text{ Second} 2_p^{Plant} = F \text{ Fuel} \text{ Solid}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.18)$$

El flujo total de materiales fermentables ($F \text{ Fermentation}_{p,t}^{Plant}$) está representado por el flujo de jugo de bagazo de agave obtenido en la primera etapa ($F \text{ Juice}_{p,t}^{Plant}$), el flujo de la primera ($F \text{ filtered} 1_{p,t}^{Plant}$) y la segunda ($F \text{ Filtered} \text{ Second}_{p,t}^{Plant}$) etapa de hidrólisis (en esta parte sólo se considera la parte hidrolizada); estos materiales fermentables están dirigidos a un proceso de fermentación para obtener bioetanol de azúcar, y el bioetanol producido se envía a una columna de destilación que se conoce como columna de pre-concentrado:

$$F \text{ Fermentation}_{p,t}^{Plant} = F \text{ Juice}_{p,t}^{Plant} + F \text{ filtered} 1_{p,t}^{Plant} + F \text{ Filtered} \text{ Second}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.19)$$

$$F \text{ Fermentation}_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha \text{ Fermentation}_{p,t}^{Plant} = F \text{ Column} 1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.20)$$

El flujo procedente de la columna de pre-concentrado es enviado a una segunda columna que se utiliza para deshidratar el bioetanol porque uno de los problemas más importantes para usar el bioetanol como combustible es el contenido de humedad. Después de la columna de deshidratado, el producto se almacena en un tanque que permite satisfacer y distribuir adecuadamente el producto a los consumidores:

$$FColumn1_{p,t}^{Plant} \alpha Destillation_p^{Plant} = FColumn2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.21)$$

$$FColumn2_{p,t}^{Plant} \alpha Dehydrated_p^{Plant} = FStock_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.22)$$

Finalmente, para tener en cuenta el almacenamiento de bioetanol en las plantas en cualquier período de tiempo t ($FTank_{p,t}^{Plant}$), se considera el bioetanol almacenado en el período anterior $t-1$ ($FTank_{p,t-1}^{Plant}$) y el bioetanol obtenido de cualquier planta de procesamiento ($FStock_{p,t}^{Plant}$) menos el bioetanol que es enviado a los mercados ($FprodBioethanol_{p,t}^{Plant}$), esto se modela a través de la siguiente expresión:

$$FTank_{p,t}^{Plant} = FTank_{p,t-1}^{Plant} + FStock_{p,t}^{Plant} - FprodBioethanol_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.23)$$

Distribución de los productos obtenidos en las plantas de procesamiento a los mercados considerados. Este balance toma en cuenta el flujo total de bioetanol obtenido en las plantas de procesamiento distribuidas y centrales. Además, se considera el flujo de combustible sólido que se obtiene en el proceso, este combustible sólido es un subproducto que puede ser económicamente atractivo. Los productos obtenidos en las plantas de procesamiento ($FprodBioethanol_{p,t}^{Plant}, FFuelSolid_{p,t}^{Plant}$) son recolectados y enviados a los mercados considerados para su venta ($gprodBioethanol_{p,m,t}^{Plant}, gprodSolidFuel_{p,m,t}^{Plant}$), estas ecuaciones son expresadas de la siguiente forma:

$$FprodBioethanol_{p,t}^{Plant} = \sum_{m \in M} gprodBioethanol_{p,m,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.24)$$

$$FFuelSolid_{p,t}^{Plant} = \sum_{m \in M} gprodSolidFuel_{p,m,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.25)$$

Se establecen ecuaciones adicionales para determinar que el flujo de los productos en los mercados ($GBioethanol_{m,t}, GSolidFuel_{m,t}$) es el mismo a los obtenidos en plantas distribuidas ($gprodBioethanol_{j,m,t}^{Distributed}, gprodSolidFuel_{j,m,t}^{Distributed}$) y plantas centrales ($gprodBioethanol_{i,m,t}^{Central}, gprodSolidFuel_{i,m,t}^{Central}$):

$$\sum_{j \in J} gprodBioethanol_{j,m,t}^{Distributed} + \sum_{l \in L} gprodBioethanol_{l,m,t}^{Central} = GBioethanol_{m,t}, \quad (3.26)$$

$$\forall m \in M, t \in T$$

$$\sum_{j \in J} gprodSolidFuel_{j,m,t}^{Distributed} + \sum_{l \in L} gprodSolidFuel_{l,m,t}^{Central} = GSolidFuel_{m,t}, \quad (3.27)$$

$$\forall m \in M, t \in T$$

Demanda de los Productos. La demanda de los productos en cierto mercado se satisface de acuerdo a una demanda máxima ($G_{m,t}^{MAX}$) y una demanda mínima ($G_{m,t}^{MIN}$) como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$GBioethanol_{m,t} \leq GBioethanol_{m,t}^{MAX}, \forall m \in M, t \in T \quad (3.28)$$

$$GSolidFuel_{m,t} \leq GSolidFuel_{m,t}^{MAX}, \forall m \in M, t \in T \quad (3.29)$$

$$GBioethanol_{m,t} \geq GBioethanol_{m,t}^{MIN}, \forall m \in M, t \in T \quad (3.30)$$

$$GSolidFuel_{m,t} \geq GSolidFuel_{m,t}^{MIN}, \forall m \in M, t \in T \quad (3.31)$$

Costos de operación de las plantas de procesamiento. Los costos de operación de la planta de procesamiento se calculan de acuerdo a los costos de operación de cada uno de los equipos de la planta, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$CostPlant^{OP} = \sum_{j \in J} \left(CoperDist_p^{Mill} + CoperDist_p^{Reactor} + CoperDist_p^{Reactor2} + CoperDist_p^{Sieve} + CoperDist_p^{Sieve2} + CoperDist_p^{Tank} + CoperDist_p^{Tank2} + CoperDist_p^{Column} + CoperDist_p^{Column2} + CoperDist_p^{TankA} \right) \quad (3.32)$$

$$\forall p \in P$$

Donde el costo individual para cada equipo depende de un costo unitario por el flujo total procesado en cada unidad:

$$CoperPlant_p^{Mill} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpMill} \cdot FTotalBagasse_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.33)$$

$$CoperPlant_p^{Reactor} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpReactor} \cdot FMill_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.34)$$

$$CoperPlant_p^{Reactor2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpReactor2} \cdot Ffiltered2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.35)$$

$$CoperPlant_p^{Sieve2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpSieve2} \cdot FReactor2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.36)$$

$$CoperPlant_p^{Sieve} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpSieve} \cdot FReactor_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.37)$$

$$CoperPlant_p^{Tank} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpTank} \cdot (Ffiltered1_{p,t}^{Plant} + FJuice_{p,t}^{Plant}), \forall p \in P \quad (3.38)$$

$$CoperPlant_p^{Tank2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpTank2} \cdot FFermentation_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.39)$$

$$CoperPlant_p^{Column} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpColumn} \cdot FColumn1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.40)$$

$$CoperPlant_p^{Column2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpColumn2} \cdot FColumn2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.41)$$

$$CoperPlant_p^{TankA} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpTankA} \cdot FStock_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.42)$$

Los costos de capital para la instalación de la planta toman en cuenta un costo fijo, un costo variable para cada una de las unidades involucradas dentro de las plantas distribuidas y centrales, estos costos se calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$CostPlant^{CAP} = K_F \sum_{p \in P} \left(\begin{array}{l} CPlant_p^{Mill} + CPlant_p^{Reactor} + CPlant_p^{Reactor2} \\ + CPlant_p^{Sieve} + CPlant_p^{Sieve2} + CPlant_p^{Tank} \\ + CPlant_p^{Column} + CPlant_p^{Column2} + CPlant_p^{TankA} \end{array} \right) \quad \forall p \in P \quad (3.43)$$

Restricciones adicionales para los flujos en cada uno de los equipos. Estas restricciones se establecen debido a que para considerar el costo del equipo es necesario tomar en cuenta el flujo que va a procesar cada equipo, por lo tanto se toma el flujo mayor de cada periodo de tiempo tomado en cuenta.

$$FTotalBagasseCAP_p^{Plant} \geq FTotalBagasse_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.44)$$

$$FMillCAP_p^{Plant} \geq FMill_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.45)$$

$$Ffiltered2CAP_p^{Plant} \geq Ffiltered2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.46)$$

$$FReactorCAP_p^{Plant} \geq FReactor_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.47)$$

$$F \text{ Reactor2} CAP_p^{Plant} \geq F \text{ Reactor2}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.48)$$

$$F \text{ Fermentation} CAP_p^{Plant} \geq F \text{ Fermentation}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.49)$$

$$F \text{ Column1} CAP_p^{Plant} \geq F \text{ Column1}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.50)$$

$$F \text{ Column2} CAP_p^{Plant} \geq F \text{ Column2}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.51)$$

$$F \text{ Stock} CAP_p^{Plant} \geq F \text{ Stock}_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (3.52)$$

Para la localización de la planta se realiza la siguiente disyunción, en donde se toman en cuenta los equipos necesarios para la producción de bioetanol, a través de la variable binaria $y_{j,q}^{Distribuid}$ se establece si el equipo existe o no existe, para lo cual se le asigna un costo fijo.

$$\left[\begin{array}{l} Y_p^{Plant} \\ F \text{ TotalBagasse} CAP_p^{Plant^{MIN}} \leq F \text{ TotalBagasse} CAP_p^{Plant} \\ F \text{ TotalBagasse} CAP_p^{Plant} \leq F \text{ TotalBagasse} CAP_p^{Plant^{MAX}} \\ C \text{ Plant}_p^{Mill} = C \text{ FixPlant}_p^{Mill} + C \text{ VarPlant}_p^{Mill} \cdot F \text{ TotalBagasse} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Reactor} = C \text{ FixPlant}_p^{Reactor} + C \text{ VarPlant}_p^{Reactor} \cdot F \text{ Mill} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Reactor2} = C \text{ FixPlant}_p^{Reactor2} + C \text{ VarPlant}_p^{Reactor2} \cdot F \text{ Filtered2} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Sieve} = C \text{ FixPlant}_p^{Sieve} + C \text{ VarPlant}_p^{Sieve} \cdot F \text{ Reactor} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Sieve2} = C \text{ FixPlant}_p^{Sieve2} + C \text{ VarPlant}_p^{Sieve2} \cdot F \text{ Reactor2} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Tank} = C \text{ FixPlant}_p^{Tank} + C \text{ VarPlant}_p^{Tank} \cdot F \text{ Fermentation} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Column} = C \text{ FixPlant}_p^{Column} + C \text{ VarPlant}_p^{Column} \cdot F \text{ Column1} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{Column2} = C \text{ FixPlant}_p^{Column2} + C \text{ VarPlant}_p^{Column2} \cdot F \text{ Column2} CAP_p^{Plant} \\ C \text{ Plant}_p^{TankA} = C \text{ FixPlant}_p^{TankA} + C \text{ VarPlant}_p^{TankA} \cdot F \text{ Stock} CAP_p^{Plant} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{l} \neg Y_p^{Plant} \\ F \text{ TotalBagasse} CAP_p^{Plant} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Mill} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Reactor} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Reactor2} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Sieve} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Sieve2} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Tank} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Column} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{Column2} = 0 \\ C \text{ Plant}_p^{TankA} = 0 \end{array} \right], \forall p \in P$$

En la disyunción anterior, la variable binaria es reformulada de la a través del uso de la variable binaria y_p^{Plant} , esta variable toma el valor de uno cuando es instalada una planta distribuida y/o central; en caso contrario, la variable binaria toma el valor de cero. Además, la instalación de una planta distribuida y/o central es instala cuando cumple con los criterios en los límites para el flujo de procesamiento de la materia prima, estos criterios se establecen en las siguientes ecuaciones:

$$FTotalBagasse_p^{Plant^{MIN}} \cdot y_p^{Plant} \leq FTotalBagasseCAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.53)$$

$$FTotalBagasseCAP_p^{Plant} \leq FTotalBagasseCAP_p^{Plant^{MAX}} \cdot y_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.54)$$

La variable binaria y_p^{Plant} es utilizada para el cálculo de los costos de capital de cada una de las unidades de procesamiento, la parte de costos fijos es multiplicada por la variable binaria, y la parte variables es igual a la multiplicación de un costo unitario por el flujo mayor de todos los periodos de tiempo considerados.

$$CPlant_p^{Mill} = CFixPlant_p^{Mill} y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Mill} FTotalBagasseCAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.55)$$

$$CPlant_p^{Reactor} = CFixPlant_p^{Reactor} \cdot y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Reactor} \cdot FMillCAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.56)$$

$$CPlant_p^{Reac2} = CFixPlant_p^{Reac2} y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Reac2} Ffiltered2CAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.57)$$

$$CPlant_p^{Sieve} = CFixPlant_p^{Sieve} \cdot y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Sieve} \cdot FReactorCAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.58)$$

$$CPlant_p^{Sieve2} = CFixPlant_p^{Sieve2} y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Sieve2} FReactor2CAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.59)$$

$$CPlant_p^{Column} = CFixPlant_p^{Column} y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Column} FColumn1CAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.60)$$

$$CPlant_p^{Colum2} = CFixPlant_p^{Colum2} y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{Colum2} FColum2CAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.61)$$

$$CPlant_p^{TankA} = CFixPlant_p^{TankA} y_p^{Plant} + CVarPlant_p^{TankA} FStockCAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (3.62)$$

Los costos de operación de las plantas de procesamiento central se calculan de manera similar que para las plantas de procesamiento distribuidas; las principales diferencias entre plantas de procesamiento distribuidas y centrales son la capacidad de procesamiento, por lo tanto es necesario tomar en cuenta las economías de escala. Además, para las plantas de procesamiento centrales se asocia una variable binaria diferente para determinar si debe instalarse cualquier planta central. Los costos de capital para las plantas de procesamiento centrales y/o distribuidas se calculan a partir la suma de los costos de capital para cada una de las unidades involucradas, y estos tienen una parte fija y una parte variable que depende de la cantidad de flujo procesado. Los datos de los costos para cada una de las unidades se muestran en la Tabla 3.2, estos costos son utilizados para el costo de la parte fija y variable de cada una de las unidades involucradas dentro de la planta de procesamiento.

Costos de transporte de pencas a planta distribuida. Estos costos consideran un costo unitario de transporte para el flujo de pencas que es enviado a las plantas distribuidas existentes para su procesamiento.

$$CostTranspLeaves^{Plant} = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} UCostTranspLeav_{i,p}^{Plant} d_{i,p}^{Plant} FLeavesBagasse_{i,p,t}^{Plant} \quad (3.63)$$

Costos de transporte de pencas a planta central. Estos costos representan el transporte de las pencas desde los lugares de cultivo a plantas centrales para el procesamiento del bagazo.

$$CostTranspLeaves^{Central} = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} UCostTranspLeav_{i,l}^{Central} d_{i,l}^{Central} FLeavesBagasse_{i,l,t}^{Central} \quad (3.64)$$

Costo de transporte de tequileras a plantas distribuidas. Estos costos determinan el costo del transporte del bagazo procedente de las industrias tequileras y que es enviado a las plantas distribuidas para su tratamiento.

$$CostTranspLeaves_{Teq}^{Dist} = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} UCostTranspBag_{k,j}^{Dist} d_{k,j}^{Dist} FBagasseTeq_{k,j,t}^{Dist} \quad (3.65)$$

Costo de transporte de tequileras a planta central. Los costos de transporte del bagazo procedente de las tequileras y que es enviado a las plantas centrales está dado por la siguiente ecuación:

$$CostTranspLeaves_{Teq}^{Central} = \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} UCostTranspBag_{k,j}^{Central} d_{k,l}^{Central} FBagasseTeq_{k,l,t}^{Central} \quad (3.66)$$

Costo de transporte de los productos. Los costos de transporte a los mercados de los productos obtenidos tanto en plantas distribuidas como en plantas centrales están dados por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
& CostTranspProdBioethanol = \\
& \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} gprodBioethanol_{j,m,t}^{Distribuid} \cdot UCostTranspBio_{j,m,t}^{Dist} \cdot d_{j,m}^{Dist} \cdot H_{M_t} + \\
& \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} gprodBioethanol_{l,m,t}^{Central} \cdot UCostTranspBio_{l,m,t}^{Central} \cdot d_{l,m}^{Cent} \cdot H_{M_t}
\end{aligned} \tag{3.67}$$

$$\begin{aligned}
& CostTranspProdBioethanol = \\
& \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} gprodBioethanol_{j,m,t}^{Distribuid} \cdot UCostTranspBio_{j,m,t}^{Dist} \cdot d_{j,m}^{Dist} \cdot H_{M_t} + \\
& \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} gprodBioethanol_{l,m,t}^{Central} \cdot UCostTranspBio_{l,m,t}^{Central} \cdot d_{l,m}^{Cent} \cdot H_{M_t}
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Para anualizar los costos correspondientes a los costos de transporte tanto de bagazo como de los productos obtenidos, así como los costos de operación de cada uno de los equipos se toma en cuenta el factor H_{M_t} , el cual representa las horas por mes de operación de la planta.

Función Objetivo. La función objetivo para este caso de estudio se basa en determinar las ganancias máximas, para lo cual se establecen los costos totales, así como las ventas y la ganancia está dada por la diferencia de ambos, como se muestra a continuación:

- Costos totales. En esta ecuación, se toman en cuenta todos los costos involucrados dentro del modelo, como costos de operación, costos de capital y costos de transporte de plantas distribuidas y planta centrales.

$$\begin{aligned}
& TotCost = \\
& \left(CostPlant^{OP} + CostPlant^{CAP} + CostTranspLeaves^{Plant} + \right. \\
& \left. + CostTranspBagasse_{Teq}^{Plant} + CostTranspProdBioethanol + \right. \\
& \left. CostTranspProdSolidFuel \right)
\end{aligned} \tag{3.69}$$

Ventas totales. En este caso, se toman en cuenta la venta de los productos obtenidos y son multiplicados por un precio de venta en el mercado.

$TotSales =$

$$\left(\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} GBioethanol_{m,t} \cdot \beta_m^{Bioethanol} + \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} GSolidFuel_{m,t} \cdot \beta_m^{SolidFuel} \right) \quad (3.70)$$

- Costo total anual. El PROFIT representa las ganancias obtenidas y de esta forma considera la factibilidad de la instalación de la planta para la obtención de bioetanol.

$$PROFIT = TotSales - TotCost \quad (3.71)$$

Tabla 3.2. Costo Unitario Fijo y Variable para Cada una de las Unidades de las Plantas Distribuidas y Centrales

Equipo	Planta Distribuida		Planta Central	
	Costo Fijo (USD)	Costo Variable (USD/kg)	Costo Fijo (USD)	Costo Variable (USD/kg)
Molino	93,500	0.063	140,250	0.057
Reactor 1^{er} Etapa	200,000	0.074	300,00	0.069
Reactor 2^{da} Etapa	225,000	0.081	337,500	0.076
Filtro 1^{er} Etapa	115,000	0.057	172,500	0.053
Filtro 2^{da} Etapa	120,000	0.062	180,000	0.055
Tanque Fermentación	105,000	0.053	150,750	0.048
Columna Destilación	320,000	0.083	480,000	0.078
Columna Des- Hidratado	310,000	0.087	465,000	0.081
Tanque almacenamiento	98,500	0.06	147,750	0.055

El modelo matemático planteado determina la distribución óptima para la posible localización de una biorefinería considerando la disponibilidad de agave procedente de las diferentes áreas de cultivo, así como de la industria tequilera. Además, considera los diferentes mercados para la distribución de los productos obtenidos (bioetanol y combustible sólido) dentro de la biorefinería.

3.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Para mostrar la aplicabilidad del modelo matemático de optimización se considera el caso de estudio en México, donde se toman en cuenta las principales regiones de cultivo de agave, así como la localización de las principales industrias de tequila y mezcal (ver Figura 3.1). Para determinar la cadena de suministro óptima, se considera la disponibilidad del agave en las regiones de cultivo consideradas para el caso de estudio, estos datos de disponibilidad de agave se muestran en la Tabla 3.3; esta información se encuentra a partir de la base de datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2013). Además, se considera la demanda de gasolina en los Estados de México, los cuales representan los mercados m que demandan biocombustibles en el modelo matemático planteado, estos datos de consumo de combustible se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3. Agave Disponible en las Principales Regiones de Cultivo de Agave en México (SAGARPA, 2013).

	Región de Cultivo	Producción (Ton/año)
1	Guanajuato	88,597
2	Guerrero	6,435
3	Jalisco	1,091,736
4	Michoacán	67,210
5	Morelos	16,801
6	Nayarit	36,545
7	Oaxaca	329,411
8	Puebla	25,174
9	Zacatecas	29,560

Tabla 3.4. Demanda de Gasolina en México (SENER, 2013).

	Estado	Consumo de Gasolina (Ton/año)x10⁻³
1	Aguascalientes	493.62
2	Baja California N	1,632.15
3	Baja California S	353.45
4	Campeche	186.06
5	Coahuila	504.31
6	Colima	841.10
7	Chiapas	796.67
8	Chihuahua	1,251.03
9	Distrito Federal	4,079.28
10	Durango	756.28
11	Guanajuato	1,349.26
12	Guerrero	535.85
13	Hidalgo	978.99
14	Jalisco	1,601.33
15	México	2,146.21
16	Michoacán	1,148.62
17	Morelos	599.99
18	Nayarit	183.81
19	Nuevo León	1,773.62
20	Oaxaca	565.34
21	Puebla	1,305.18
22	Querétaro	829.44
23	San Luis Potosí	644.05
24	Sinaloa	1,093.20
25	Sonora	981.38
26	Tabasco	727.91
27	Tamaulipas	1,204.99
28	Veracruz	1,762.23
29	Yucatán	1,012.26
30	Zacatecas	326.71

Estos datos obtenidos por la base de datos de la Secretaria de Energía (SENER, 2013) representan el consumo total de gasolina en cada estado, sin embargo, en el modelo matemático se plantea satisfacer la demanda de acuerdo a este consumo de combustibles de forma que cierto porcentaje de la gasolina puede ser sustituida por bioetanol. El modelo considera nueve zonas agrícolas para el cultivo de agave (Guanajuato, Zacatecas, Jalisco,

Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla y Zacatecas), seis de las principales industrias de producción de tequila, Tequila, Jal. (1), Tequila Jal. (2), Pénjamo, Oaxaca, Morelos y Zacatecas. Por otro lado, se considerada la posible instalación de tres plantas de procesamiento centrales para la producción de bioetanol (Tequila, Oaxaca e Irapuato) y seis plantas de procesamiento distribuidas (Chilpancingo, Morelia, Cuernavaca, Tepic, Puebla y Fresnillo). El modelo matemático propuesto fue codificado en el software de GAMS y se utilizó el resolutor CPLEX (Brooke et al., 2013). Par este caso de estudio, el modelo presenta 12,534 variables continuas, 9 variables binarias y 7,189 restricciones. Se propusieron diferentes escenarios para determinar la aplicabilidad de la metodología propuesta. En el Escenario A se considera la solución económica con una restricción de la demanda satisfecha de bioetanol igual al 1% de la demanda total de gasolina en cada uno de los mercados considerados. En el Escenario B se considera el caso donde la demanda de bioetanol no está limitada en cada uno de los mercados. Para cada escenario, se presentan las curvas Pareto para tener en cuenta el comportamiento entre el consumo de agave versus la ganancia total anual. Además, se presenta una comparación de ambos escenarios para mostrar la mejor solución económica entre las ganancias y la demanda de bioetanol. Finalmente, el escenario C toma en cuenta la alternativa cuando es posible aumentar el área de cultivo para satisfacer una mayor demanda de bioetanol; en este escenario C se considera la disponibilidad de la tierra de cultivo y el agua necesaria de acuerdo al incremento en el área de cultivo.

3.4.1 Escenario A, satisfacer el 1% de la demanda total de combustibles.

La solución óptima para el escenario A establece la instalación de dos plantas centrales, la Central 1, en la ciudad de Tequila en el estado de Jalisco y la Central 2, en la ciudad de Oaxaca, en el estado de Oaxaca; en este escenario no se seleccionaron la instalación de plantas de procesamiento distribuidas. La planta de procesamiento Central 1 recibe bagazo del Área de Cultivo 3 (ubicado en el estado de Jalisco) con un flujo de 4.32×10^8 kg de bagazo por año y del Área de Cultivo 6 (ubicado en el estado de Nayarit) con un flujo de 1.11×10^7 kg/año. La planta de procesamiento Central 2 se alimenta con el flujo procedente del Área de Cultivo de 7 (Oaxaca) con un flujo de 1.32×10^8 kg/año. Además, las plantas centrales de procesamiento son alimentadas con el flujo de bagazo de la industria tequilera. En este

sentido, la industria Tequilera 1 (ubicado en la ciudad de Tequila) y la industria Tequilera 2 (situado también en la ciudad de Tequila) alimentan un flujo de bagazo a la planta Central 1, estas tequileras aportan un flujo de 1.12×10^8 kg/año y 1.21×10^7 kg/año, respectivamente. Para el caso de la Planta Central 2, ésta se alimenta con un flujo de 3.08×10^8 kg/año de bagazo de agave tequilero procedente de la industria Tequilera 4 (ubicado en la ciudad de Oaxaca).

Tabla 3.5. Distribución del Bioetanol Obtenido para el Escenario A.

Planta de Procesamiento	Marcado	Flujo (Ton/año) $\times 10^{-3}$
Central 1	1 (Aguascalientes)	4.94
	2 (Baja California Norte)	16.30
	3 (Baja California Sur)	3.53
	5 (Coahuila)	5.04
	6 (Colima)	8.41
	8 (Chihuahua)	12.50
	10 (Durango)	7.56
	11 (Guanajuato)	13.50
	14 (Jalisco)	16.00
	15 (México)	8.82
	16 (Michoacán)	11.50
	18 (Nayarit)	1.84
	19 (Nuevo León)	17.70
	22 (Querétaro)	8.29
	23 (San Luis Potosí)	6.44
	24 (Sinaloa)	10.90
	25 (Sonora)	9.81
	27 (Tamaulipas)	12.10
	30 (Zacatecas)	3.27
Central 2	4 (Campeche)	1.86
	7 (Chiapas)	7.97
	9 (Distrito Federal)	40.80
	12 (Guerrero)	5.36
	13 (Hidalgo)	9.79
	15 (México)	12.60
	17 (Morelos)	6.00
	20 (Oaxaca)	5.65
	21 (Puebla)	13.10
	26 (Tabasco)	7.28
	28 (Veracruz)	17.60
	29 (Yucatán)	10.10

A partir de los flujos alimentados a cada una de las plantas instaladas, es posible la producción de 1.79×10^8 kg de bioetanol por año para la Planta Central 1 y 1.38×10^8 kg/año de bioetanol para la Planta Central 2. El bioetanol obtenido es enviado a los mercados m considerados (el flujo de bioetanol que es enviado a cada uno de los mercado se muestra en la Tabla 3.5).

En la Figura 3.6 se muestra la cobertura de la demanda de la cadena de suministro óptima encontrada para el Escenario A. La cadena de suministro óptima se resolvió tomando en cuenta la restricción de satisfacer el 1% de la demanda en cada uno de los mercados. Sin embargo, esta restricción está sujeta a la demanda en cada mercado, por lo tanto, el bioetanol es consumido en todos los mercados pero la parte consumida en cada mercado es diferente debido a la demanda. De acuerdo a la solución económica para este escenario A, fue consumido el 85% del bagazo de agave disponible. La cadena de suministro óptima presenta una ganancia total anual de 1.5337×10^8 USD/año; donde las ventas y los costos son 3.72646×10^8 USD/año y 2.1927×10^8 USD/año, respectivamente. Durante el proceso de producción de bioetanol, los residuos de agave pueden ser vendidos como combustible sólido, agregando un importante valor monetario; estos residuos proporcionan 2.1645×10^6 USD/año debido a las ventas totales.



Figura 3.6. Cobertura de la Demanda de Bioetanol para el Escenario A.

Realizando un análisis para conocer la distribución de acuerdo a la demanda de biocombustibles en los mercados es posible realizar la curva Pareto que se muestra en la Figura 3.7.

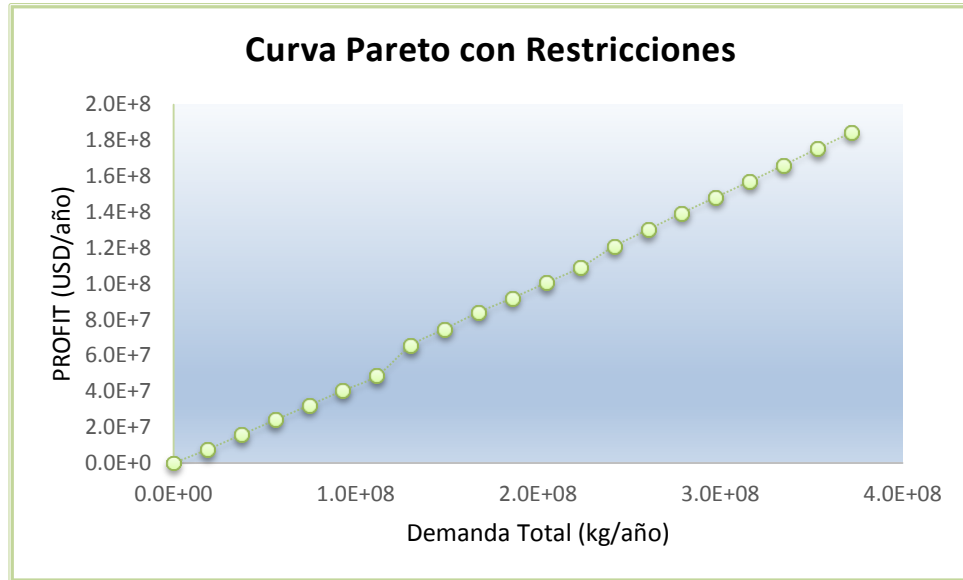


Figura 3.7. Curva Pareto para el Escenario A.

A partir de la curva Pareto es posible analizar diferentes puntos de acuerdo a la demanda cubierta de bioetanol y así conocer la ganancia de acuerdo a la distribución obtenida.

Caso 1 (Demanda con un 40% de agave consumido). Para este caso de estudio la distribución obtenida es la instalación de la planta Central 1 (Tequila, Jal). Esta planta recibe flujo de bagazo procedente de las áreas de Cultivo 3 (Jalisco) y 6 (Nayarit) las cuales aportan un flujo de bagazo de 2.56×10^8 kg/año y 1.46×10^7 kg/año respectivamente. Además, la planta central elegida recibe un flujo de bagazo procedente de las Tequileras 1 y 2 (Tequila, Jal), las cuales aporta un flujo de 9.97×10^7 kg/año y 1.03×10^8 kg/año, respectivamente. Con este flujo de bagazo alimentado es posible obtener 1.49×10^8 kg/año de bioetanol. La distribución del bioetanol se muestra en la Figura 3.8, la cual cubre sólo algunos de los 30 mercados considerados. A partir de la distribución encontrada, es posible obtener una ganancia de 1.5337×10^8 USD/año.



Figura 3.8. Área de Distribución del Bioetanol para el Caso 1.

Caso 2 (Demanda con un 75% de agave consumido). Para este caso de estudio, la distribución obtenida involucra la instalación de dos plantas centrales, la Central 1 (Tequila, Jal) y la Central 3 (Irapuato, Gto). La Central 1 recibe flujo de bagazo procedente del área de Cultivo 6 (Nayarit) con un flujo de 1.46×10^7 kg/año, mientras que la Central 3 recibe bagazo de las áreas de Cultivo 1 (Guanajuato), 3 (Jalisco) y 4 (Michoacán), las cuales aportan un flujo de bagazo de 3.54×10^7 kg/año, 4.37×10^8 kg/año y 1.35×10^7 kg/año, respectivamente. Además, la planta central elegida recibe un flujo de bagazo procedente de la industria tequilera, las Tequileras 1 y 2 (Tequila, Jal), las cuales aportan un flujo de 2.83×10^8 kg/año y 6.26×10^7 kg/año, respectivamente a la Central 1. La Central 3 recibe un flujo de 3.52×10^7 kg/año por parte de la Tequilera 3 (Pénjamo, Gto). Con este flujo de bagazo alimentado es posible obtener 1.13×10^8 kg/año de bioetanol de la Central 1 y 1.66×10^8 kg/año de bioetanol de la Central 3. La distribución del bioetanol en los mercados considerados se muestra en la Figura 3.9, donde la ganancia asociada a esta cadena de suministro es de 1.3949×10^8 USD/año.

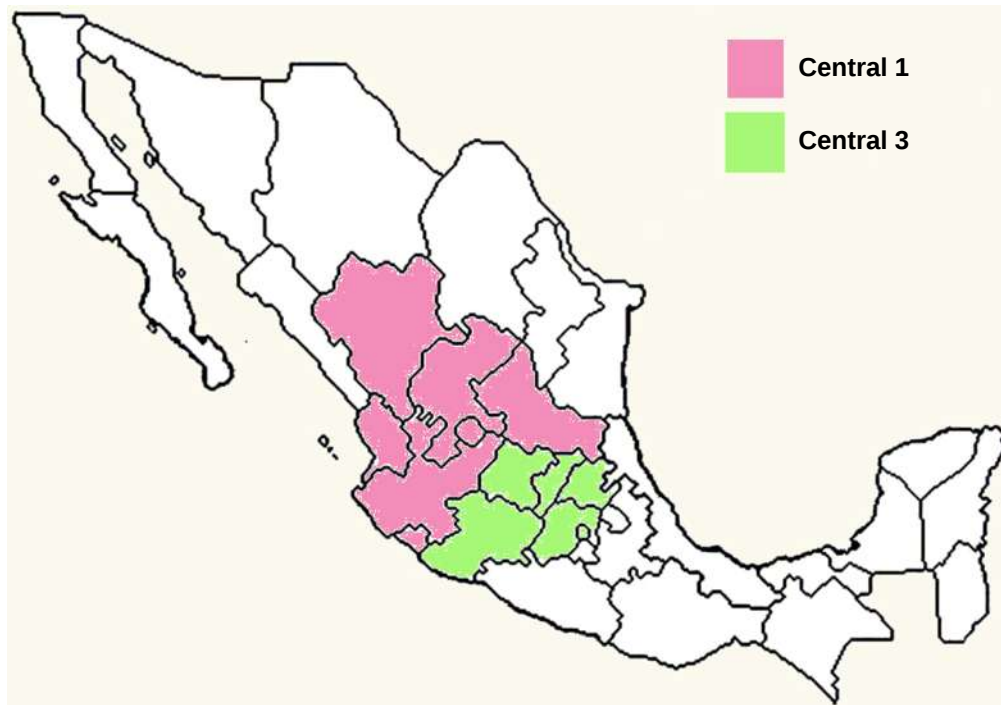


Figura 3.9. Áreas para la Distribución del Bioetanol del Caso 2.

3.4.2 Escenario B, solución sin restricciones.

En este caso se resuelve el modelo sin restricciones adicionales, es decir, se realiza la distribución sin considerar satisfacer cierta demanda en los mercados. La solución óptima encontrada establece la instalación de las 3 plantas centrales (Central 1, Tequila, Jalisco; Central 2, Oaxaca; Central 3, Irapuato, Guanajuato) y una planta distribuida (Distribuida 3, Cuernavaca, Mor). En la Tabla 3.6, se muestra el flujo de alimentación de bagazo por parte de las áreas de cultivo y los residuos de la industria tequilera. Además, en la Tabla 3.7 se muestra el flujo de bioetanol obtenido para cada planta de procesamiento que es instalada en la solución óptima encontrada. El flujo total del bioetanol obtenido es enviado a los diferentes mercados considerados. Sin embargo, en este caso no existe una restricción para satisfacer alguna demanda en específico en los mercados; por esta razón, en la solución óptima encontrada las plantas de procesamiento envían el bioetanol obtenido a los mercados más cercanos, tal como se muestra en la Figura 3.10. Por esta razón, la demanda satisfecha en algunos mercados es alrededor del 50% en ciertos períodos de tiempo. Sin embargo, la

demanda satisfecha en promedio es de alrededor 10% al 20%. Finalmente, la ganancia total de la cadena de suministro óptima encontrada es de 1.8541x10⁸ USD/año.

Tabla 3.6. Flujo de Bagazo de Agave que es Alimentado en Cada Planta en el Escenario B.

Planta de Procesamiento	Área de Cultivo	Flujo (Ton/año) $\times 10^{-3}$	Industria Tequilera	Flujo (Ton/año) $\times 10^{-3}$
Central 1 (Tequila, Jal)	3 (Jalisco)	143.00	1(Tequila, Jal.)	70.60
	6 (Nayarit)	14.60	2(Tequila, Jal.)	124.00
	9 (Zacatecas)	7.88		
Central 2 (Oaxaca, Oax.)	7 (Oaxaca)	132.00	4(Oaxaca, Oax)	228.00
Central 3 (Irapuato, Gto.)	1 (Guanajuato)	35.40		
	3 (Jalisco)	294.00		
	4 (Michoacán)	26.90		
	9 (Zacatecas)	3.94		
Distribuida 3 (Cuernavaca, Mor.)	2 (Guerrero)	2.57		
	5 (Morelos)	6.72		
	8 (Puebla)	10.10		

Tabla 3.7. Flujo Total de Bioetanol Producido en la Solución Óptima del Escenario B.

Planta de Procesamiento	Bioetanol producido (Ton/año) $\times 10^{-3}$
Central 1 (Tequila)	113
Central 2 (Oaxaca)	113
Central 3 (Irapuato)	113
Distribuida 3 (Cuernavaca)	327

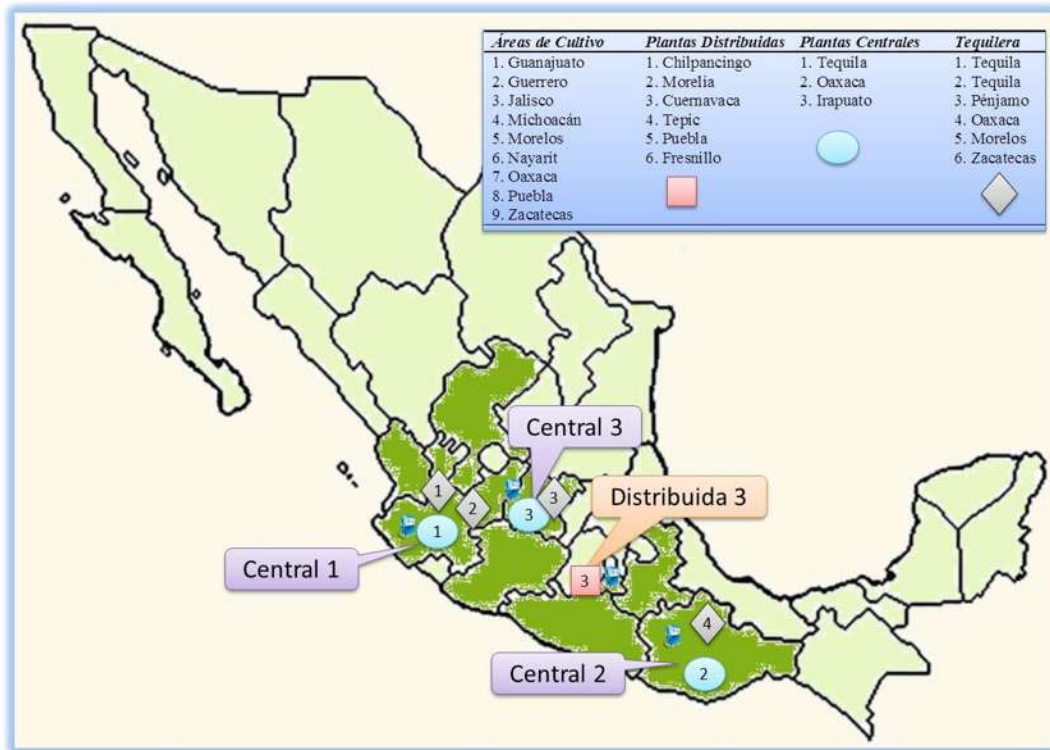


Figura 3.10. Distribución Óptima para el Escenario B.

Realizando el mismo análisis que el escenario anterior, se construye la curva Pareto para conocer las ganancias de acuerdo a la demanda cubierta. En la Figura 3.11 se muestra la curva Pareto obtenida para el Escenario 2.

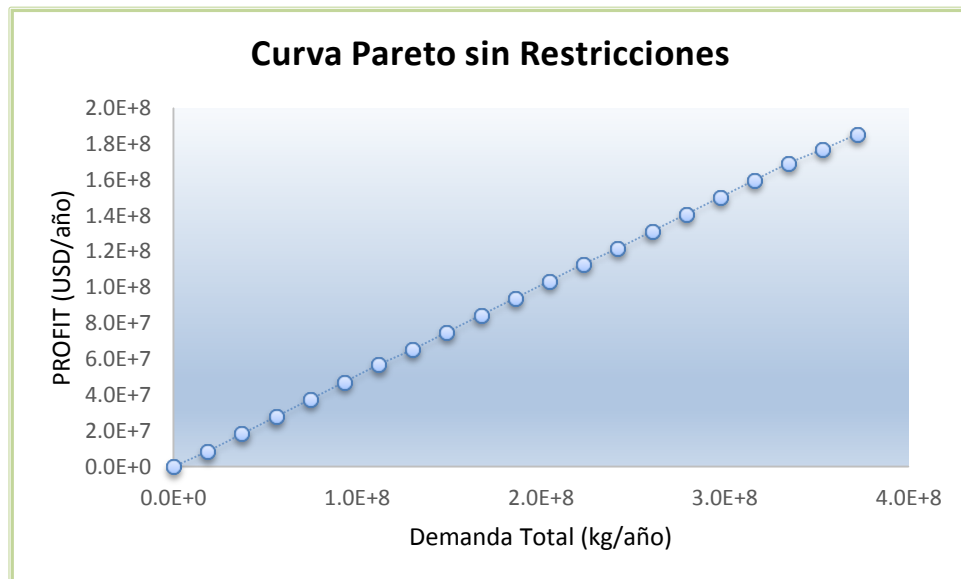


Figura 3.11. Curva Pareto para el Escenario B.

En la Figura 3.12 se muestra una comparación de ambos escenarios. En esta comparación se muestra que ambas curvas Pareto pueden obtener casi las mismas ganancias de acuerdo a la demanda cubierta, por lo cual con esta comparación se puede concluir que a nivel económico los costos de transporte de bagazo y de los productos obtenidos son despreciables, ya que no afectan las ganancias obtenidas para cada distribución.

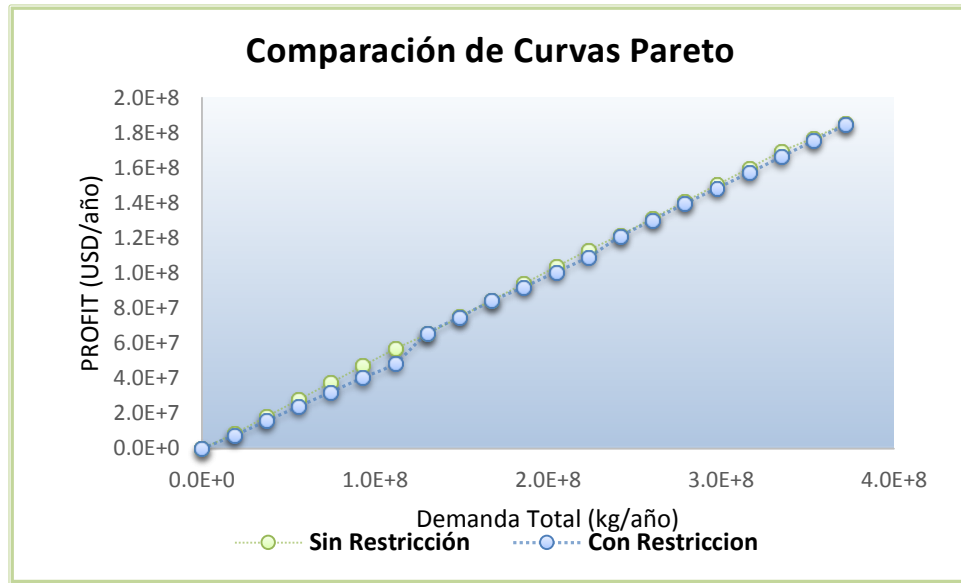


Figura 3.12. Comparación de las Curvas Pareto de los Escenarios A y B.

3.4.3 Escenario C, incremento de las áreas de cultivo de agave.

En este último escenario propuesto se establece la posibilidad de incrementar el área de las regiones de cultivo con la finalidad de aumentar la cosecha de agave y con esto satisfacer una mayor demanda de bioetanol. Además, en este escenario se realiza un análisis de la rentabilidad del uso del bagazo de agave para la producción de bioetanol. Este escenario se propuso debido que la producción de agave no es suficiente para satisfacer la demanda total de bioetanol en México y debido a que el agave es una planta perene puede requerir más de 5 años para su crecimiento. En este sentido, es necesario realizar una planeación óptima para determinar la localización de las factibles zonas de cultivo de agave. Para implementar este cambio en la disponibilidad del agave, el límite máximo para la variable $Inc_{i,t}^{Possible\ increasing}$ (Eq.

(3.4)) es cambiado de 1 a 6; cuando este es cambiado, la cantidad de agave disponible es incrementado de 100% al 600% más del actual disponible.

De acuerdo con los resultado obtenidos, la demanda máxima de bioetanol que puede satisfacerse es aproximadamente del 3.8% de la demanda total de gasolina con un incremento del 400% del agave disponible. Actualmente, la gasolina es mezclada con bioetanol para uso en el transporte, la composición más común es 90-10% aunque esta concentración depende de cada país; en este contexto, la demanda total de bioetanol satisfecha puede alcanzar el 40%. Sin embargo, el incremento en las áreas de cultivo requiere un mayor uso de tierras, cambio de uso de tierra, irrigación y agua de proceso debido al incremento en la producción de bioetanol. En la Tabla 3.8 se muestran las superficies necesarias para el incremento en el cultivo de agave así como para la producción de bioetanol.

Tabla 3.8. Área de Terreno Adicional Requerida para el Incremento en el Cultivo de Agave para el Escenario C.

Incremento Máximo %	100	200	300	400	500	600
Área de Cultivo	Nueva Área (Ha) $\times 10^{-3}$	Nueva Área (Ha) $\times 10^{-3}$	Nueva Área (Ha) $\times 10^{-3}$	Nueva Área (Ha) $\times 10^{-3}$	Nueva Área (Ha) $\times 10^{-3}$	Nueva Área (Ha) $\times 10^{-3}$
1	1.03	2.05	3.08	4.10	5.13	6.16
2	0.07	0.15	0.22	0.30	0.37	0.45
3	12.40	24.86	22.94	18.60	15.47	12.34
4	0.18	1.56	2.34	3.11	3.89	4.67
5	0.19	0.39	0.58	0.78	0.97	1.17
6	0.42	0.85	1.27	1.69	2.12	2.54
7	3.81	7.63	11.42	12.63	12.63	12.63
8	0.29	0.58	0.87	1.17	1.46	1.75
9	0.34	0.68	1.03	1.37	1.71	2.05

Finalmente, en la Tabla 3.9 se presenta la cantidad de agua necesaria para la producción de bioetanol cuando se considera la posibilidad del incrementar la disponibilidad de agave. El uso de agua es obtenida de acuerdo a la producción de bioetanol de cada planta. En estos resultados se ve reflejado el agua de lluvia de acuerdo a la precipitación mensual de cada región, el cual para una buena producción de agave, se requiere alrededor de 600-800

mm de agua. Los resultados para este caso muestran que aproximadamente se requieren de $365 \times 10^3 \text{ m}^3$ a $122 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua.

Tabla 3.9. Agua Utilizada Considerada para el Incremento de Agave del Escenario C.

Incremento Máximo %	100	200	300	400	500	600
Área de Cultivo	Uso de Agua (m^3) $\times 10^{-3}$	Uso de Agua (m^3) $\times 10^{-3}$	Uso de Agua (m^3) $\times 10^{-3}$	Uso de Agua (m^3) $\times 10^{-3}$	Uso de Agua (m^3) $\times 10^{-3}$	Uso de Agua (m^3) $\times 10^{-3}$
1	5,028	10,055	15,083	20,110	25,138	30,165
2	365	730	1,096	1,461	1,826	2,191
3	60,761	121,814	112,421	91,141	75,801	60,462
4	889	7,628	11,442	15,256	19,069	22,883
5	953	1,907	2,860	3,814	4,767	5,720
6	2,074	4,148	6,221	8,295	10,369	12,443
7	18,693	37,385	55,941	61,881	61,881	61,881
8	1,429	2,857	4,286	5,714	7,143	8,571
9	1,677	3,355	5,032	6,710	8,387	10,064

Tabla 3.10. Agua Utilizada Considerada por el Incremento de Agave del Escenario C para la Producción de Bioetanol

Incremento	1	2	3	4	5	6
Planta	Agua de Proceso (m^3) $\times 10^{-3}$	Agua de Proceso (m^3) $\times 10^{-3}$	Agua de Proceso (m^3) $\times 10^{-3}$	Agua de Proceso (m^3) $\times 10^{-3}$	Agua de Proceso (m^3) $\times 10^{-3}$	Agua de Proceso (m^3) $\times 10^{-3}$
C1	568	568	568	568	568	568
C2	568	568	568	568	568	568
C3	568	568	568	568	568	568
D1	0	29	331	358	358	358
D2	0	358	358	358	358	358
D3	358	358	358	358	358	358
D4	0	358	358	358	358	358
D5	0	358	358	358	358	358
D6	254	358	358	358	358	358

Además, el agua requerida para el procesamiento se muestra en la Tabla 3.10. En este contexto, la cantidad de agua utilizada no cambia de manera importante debido a que las plantas operan a su máxima capacidad con la finalidad de obtener la mayor cantidad de bioetanol.

Estos resultados obtenidos son específicamente para el caso de estudio propuesto. Sin embargo la metodología puede ser aplicable a otros casos de estudio, como es el hecho de considerar algunas otras regiones de cultivo de agave, la posible instalación de otras plantas de procesamiento, considerar otras industrias productoras de tequila, etc. En este sentido, el modelo presenta cierta flexibilidad para proponer diferentes casos de estudio, y de esta forma encontrar la cadena de suministro óptima.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE AGAVE

En este Capítulo se propone una metodología para determinar la cadena de suministro óptima de la obtención de bioetanol a través de los residuos de agave de las áreas de cultivo y la industria tequilera en México. Se propone un modelo matemático de optimización multi-objetivo en el cual es posible considerar simultáneamente los aspectos económicos y ambientales a lo largo de la cadena de suministro.

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Recientemente, los biocombustibles han sido el principal tema de investigación debido a su gran potencial para sustituir los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. En la actualidad, existen varias técnicas para la producción de biocombustibles, una de las alternativas más prometedoras es a partir del uso como materia prima, los residuos con alto contenido en material lignocelulósico. Algunas investigaciones se han enfocado en el análisis de las ventajas sobre el uso de estas tecnologías.

Teniendo esto en mente, en este trabajo se pretende abordar la problemática sobre el diseño de una cadena de suministro de una biorefinería considerando los residuos de la industria tequilera en México, y considerando simultáneamente aspectos ambientales y económicos. Para el caso de la evaluación del impacto ambiental, se toma como base la metodología del indicador de Eco 99, el cual evalúa el daño ambiental a través de tres

categorías de impacto (daños a los recursos, daños a la salud humana y daños al ecosistema). Para la parte de diseño es necesario formular un modelo de programación matemático MILP multi-objetivo en el cual se incluye diversos grupos de ecuaciones, entre los cuales se encuentran los balances de masa y energía, y sistemas de ecuaciones para la evaluación económica y ambiental.

4.2 FORMULACIÓN DE LA SUPERESTRUCTURA DE ESTUDIO

El caso de estudio que se analizó en este trabajo se muestra en la Figura 4.1. Se considera que la cadena de suministro óptima está integrada por tres sistemas (producción, almacenamiento, y transporte final a los consumidores). Además, se toma en cuenta que la disponibilidad de agave se encuentra en diferentes presentaciones (es decir, la planta disponible utilizada para la producción de tequila, las pencas procedentes de los lugares de cultivo y los residuos generados por la industria tequilera durante el proceso de producción de tequila). Las industrias tequileras, así como los centros de procesamiento para la producción de bioetanol pueden ser establecidos en varios lugares, estos pueden ser definidos previamente para satisfacer la demanda de bioetanol en los mercados finales considerados dentro del caso de estudio. El problema entonces consiste en determinar la distribución óptima de los residuos de agave, número requerido, ubicación y capacidad de las biorefinerías (junto con la tecnología utilizada en cada uno de ellos) y la distribución de productos y materias primas.



Figura 4.1. Caso de Estudio para la Cadena de Suministro de la Producción de Bioetanol a partir de los Residuos del Agave en México.

En la Figura 4.2 se muestra la superestructura asociada con el caso de estudio descrito anteriormente. Esta superestructura es una representación matemática, la cual incluye los principales lugares con disponibilidad de materia prima, las alternativas de biorefinerías y los mercados considerados para la venta de los productos obtenidos. Además, se consideran diferentes alternativas de transporte, es decir, los productos y materias primas, pueden ser transportados por camión, tren y tubería, estas alternativas son representadas por los colores rojos, negros y azules en la Figura 4.2. Las biorefinerías toman en cuenta la tecnología de procesamiento de materia prima para la obtención de bioetanol que se muestra en la Figura 4.3, ya que se cuenta con los datos experimentales necesarios de esta tecnología, los cuales fueron probados en plantas piloto. El proceso de producción de bioetanol toma en cuenta diferentes etapas. En la primera etapa, se presenta la etapa de tratamiento previo, donde la materia prima se muele para obtener el tamaño deseado. La siguiente etapa es el proceso de hidrólisis, el cual es seguido por la etapa de fermentación de los azúcares obtenidos en las

dos etapas anteriores. Finalmente, se presenta la etapa de separación, donde se contemplan dos secciones de separación: la sección de pre-concentrado y la sección de deshidratado. Se consideran dos tipos de biorefinerías: las plantas de procesamiento centrales y distribuidas, ambas aplican la misma tecnología de procesamiento que muestra en la Figura 4.3. La diferencia entre estas plantas es el volumen de materia prima que pueden procesar (es decir, las plantas centrales presentan una mayor capacidad de procesamiento).

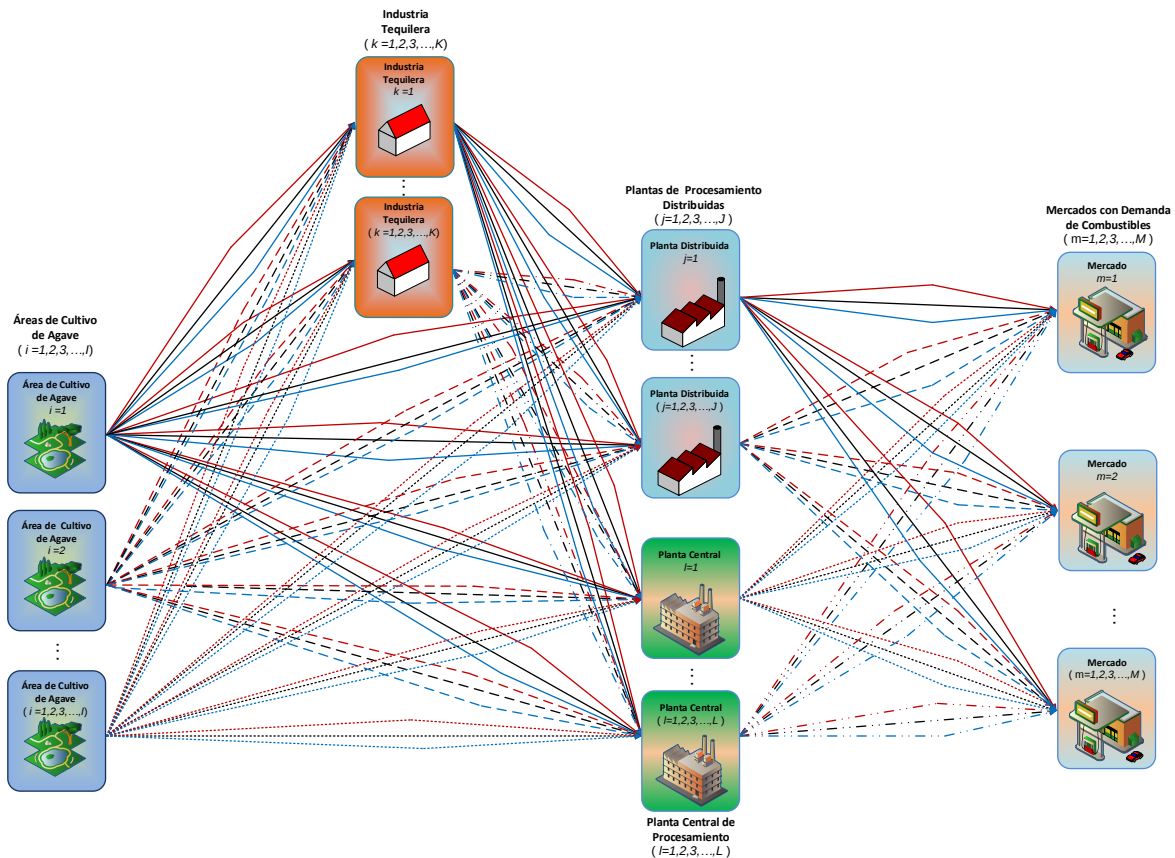


Figura 4.2. Superestructura para la Formulación del Modelo de Optimización Multi-Objetivo del Caso de Estudio México.

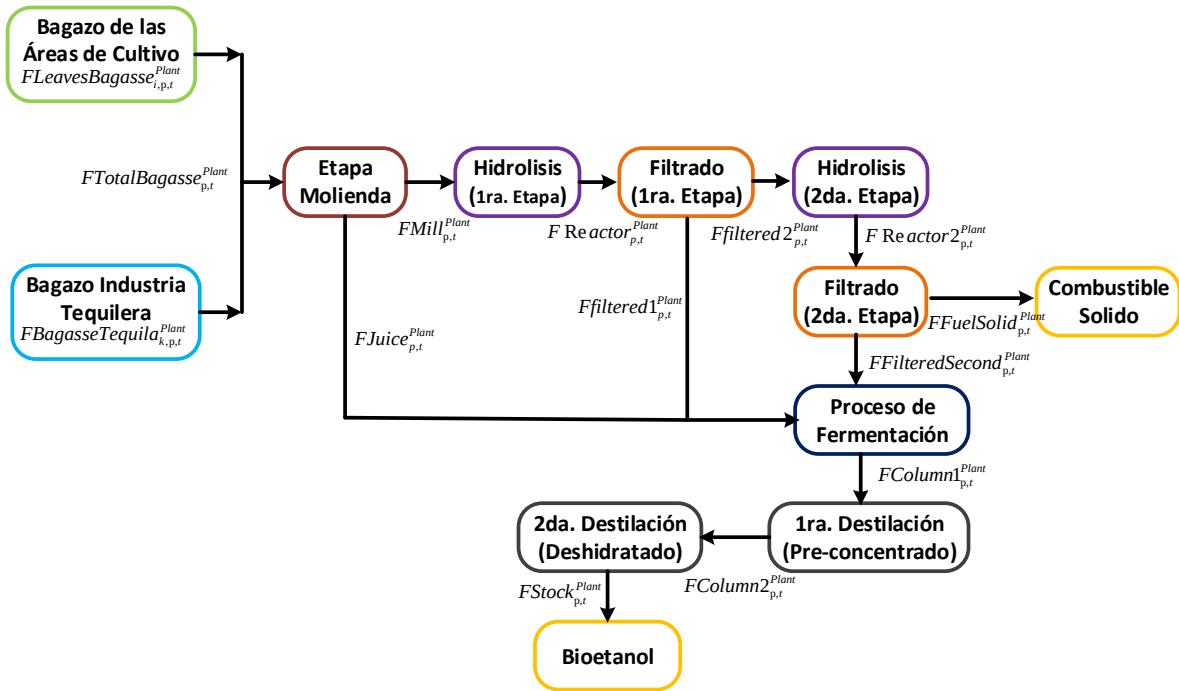


Figura 4.3. Diagrama de la Biorefinería para el Procesamiento del Bagazo de Agave.

4.3 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN

En esta sección se muestra el modelo de optimización multi-objetivo para la cadena de suministro para la obtención de bioetanol a partir de los residuos del agave en México. El modelo toma en cuenta los siguientes grupos de ecuaciones: i índice para las áreas de cultivo de agave, j es el índice para las plantas de procesamiento distribuidas, l es el índice que representa las plantas de procesamiento centrales. Los índices j y l que representan las plantas distribuidas y centrales son agrupadas en el índice p para reducir el número de ecuaciones. El grupo de industrias tequileras de interés está denominado por el índice k , mientras que el índice m representa las localizaciones donde existe demanda de bioetanol. El índice $N1$ representa los lugares con demanda de combustible sólido. Finalmente, los periodos de tiempo son definidos por el índice t , mientras que las diferentes alternativas de transporte están definidas por el índice w . A continuación se detallan las ecuaciones involucradas en el modelo matemático planteado.

Balance en las áreas de cultivo. Para la producción de tequila se considera sólo el uso de las piñas. Por lo tanto, en las regiones de cultivo se presenta un flujo de le las pencas que en la actualidad no tienen ningún uso de interés comercial. Por lo tanto, el flujo de piñas en las áreas de cultivo ($FPlantHeads_{i,t}$) se determina por el flujo total de agave disponible ($FAgave_{i,t}$) y un factor de porcentaje de la piña en la planta de agave (zAH_i):

$$FAgave_{i,t} \cdot zAH_i = FPlantHeads_{i,t}, \forall i \in I, t \in T \quad (4.1)$$

El flujo correspondiente a las pencas ($FTotLeavBag_{i,t}$) representa el material lignocelulósico que puede ser utilizado para la producción de bioetanol.

$$FAgave_{i,t} \cdot zAL_i = FTotLeavBag_{i,t}, \forall i \in I, t \in T \quad (4.2)$$

El flujo total de pencas es enviado a plantas distribuidas y plantas centrales para su procesamiento:

$$FTotLeavBag_{i,t} = \sum_{j \in J} FLeavBag_{i,j,t}^{Distributed} + \sum_{l \in L} FLeavBag_{i,l,t}^{Central}, \forall i \in I, t \in T \quad (4.3)$$

Balances en la industria tequilera. El flujo de piñas procedentes de las áreas de cultivo de agave ($FPlantHeads_{i,t}$) pueden ser distribuidas a las diferentes industrias productoras de tequila en los diferentes periodos de tiempo considerados ($FPlantHeads_{i,k,t}^{TequilaIndustry}$):

$$FPlantHeads_{i,t} = \sum_{k \in K} FPlantHeads_{i,k,t}^{TequilaIndustry}, \forall i \in I, t \in T \quad (4.4)$$

Residuos de bagazo de agave de la industria tequilera. Durante el proceso de obtención del tequila son generados grandes cantidades de residuo de material lignocelulósico después del procesamiento de las piñas de agave. Estos residuos pueden ser utilizados para la obtención de bioetanol. Por lo tanto, el flujo de bagazo obtenido en la industria tequilera ($FTequilaBagasse_{k,t}$) depende del factor de eficiencia ($zCooked_k$) de la industria tequilera:

$$FTequilaBag_{k,t} = FTotalHeads_{k,t}^{TequilaIndustry} \cdot zCooked_k, \forall k \in K, t \in T \quad (4.5)$$

El bagazo es enviado a las diferentes plantas distribuidas y centrales para su procesamiento:

$$FTequilaBag_{k,t} = \sum_{j \in J} FBagTequila_{k,j,t}^{Distributed} + \sum_{l \in L} FBagTequila_{k,l,t}^{Central}, \forall k \in K, t \in T \quad (4.6)$$

Balances en Biorefinerías. Las ecuaciones para las plantas de procesamiento centrales y distribuidas son agrupadas utilizando el índice *Plant*. En el siguiente balance se toma en cuenta el flujo total de bagazo que es procesado en cada planta ($FTotalBag_{p,t}^{Plant}$), el cual toma en cuenta el flujo de bagazo de las áreas de cultivo ($FLeavBag_{p,t}$) y el flujo de bagazo que se obtiene de la industria tequilera ($FBagTequila_{k,p,t}^{Plant}$):

$$FTotalBag_{p,t}^{Plant} = \sum_{k \in K} FBagTequila_{k,p,t}^{Plant} + \sum_{p \in P} FLeavBag_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.7)$$

Los pasos involucrados para la obtención del bioetanol de acuerdo con la Figura 4.4, son descritos dentro de las Ecuaciones (4.8) a la (4.23). Donde se consideran los factores de conversión α_p^{Plant} para cada una de las etapas consideradas en el proceso, estos factores se obtuvieron de acuerdo a datos experimentales. En la primera etapa, el bagazo de agave es procesado para disminuir el tamaño de partícula a través de un proceso de molienda:

$$FTotalBag_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha_{Mill_p}^{Plant} = FMill_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.8)$$

Durante el proceso de molienda es obtenido un jugo con alto contenido de azúcares, el cual también es procesado para la producción de bioetanol:

$$FTotalBag_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha_{Juice_p}^{Plant} = FJuice_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.9)$$

El flujo de la etapa de molienda es enviado a la etapa de hidrólisis.

$$FMill_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha_{Reactor_p}^{Plant} = FReact_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.10)$$

Después de la primera etapa de reacción, se realiza una separación donde el flujo hidrolizado es enviado a los tanques de fermentación, mientras que la parte no hidrolizada es enviada a una segunda etapa de hidrólisis para la obtención de una mayor cantidad de material

fermentable. La separación después de la primera etapa de hidrólisis es modelada a través de las Ecuaciones (4.11) y (4.12):

$$F React_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Filtred1_p^{Plant} = Ffilt1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.11)$$

$$F React_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Filtred2_p^{Plant} = Ffilt2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.12)$$

Después de la segunda etapa de hidrólisis, el flujo es separado en material fermentable ($FFilteredSecond_{p,t}^{Plant}$) y el combustible sólido ($FFuelSolid_{p,t}^{Plant}$) que representa la parte a la cual ya no se le pueden extraer más materiales fermentables:

$$Ffilt2_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Reactor2_p^{Plant} = F React2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.13)$$

$$F React2_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Filtered second1_p^{Plant} = FFilteredSecond_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.14)$$

$$F React2_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha FilteredSecond2_p^{Plant} = FFuelSolid_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.15)$$

El material fermentable ($FFerment_{p,t}^{Plant}$) son los jugos procedentes de la etapa primaria ($FJuice_{p,t}^{Plant}$), el flujo de la primera etapa de hidrólisis ($Ffilt1_{p,t}^{Plant}$) y finalmente el flujo obtenido en la segunda etapa de reacción ($FFilteredSecond_{p,t}^{Plant}$). Estos materiales fermentables son enviados al proceso de fermentación para la obtención de bioetanol a partir de los azúcares obtenidos. El bioetanol obtenido es enviado a la columna de destilación, la cual es conocida como la columna de concentración:

$$FFerment_{p,t}^{Plant} = FJuice_{p,t}^{Plant} + Ffilt1_{p,t}^{Plant} + FFilteredSecond_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.16)$$

$$FFerment_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Fermentation_p^{Plant} = FCol1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.17)$$

Los materiales de la columna de concentración son enviados a una segunda columna de destilación, la cual es usada para la deshidratación del bioetanol. Después de la columna de deshidratación, el producto es almacenado, lo cual permite satisfacer y distribuir adecuadamente el producto a los consumidores:

$$FCol1_{p,t}^{Plant} \cdot \alpha Distill_p^{Plant} = FCol2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.18)$$

$$FCol2_{p,t}^{Plant} \alpha Dehydrated_p^{Plant} = FStock_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.19)$$

Distribución de los productos de las plantas de procesamiento a los mercados. El bioetanol obtenido en las plantas de procesamiento ($FStock_{p,t}^{Plant}$) es enviado a los mercados con demanda de biocombustibles ($gprodBioet_{j,m,t}^{Distributed}$):

$$FStock_{p,t}^{Plant} = \sum_{m \in M} gprodBioet_{p,m,t}^{Plant}, \forall j \in J, t \in T \quad (4.20)$$

La demanda total de combustibles en cada mercado puede satisfacerse con gasolina pura o una mezcla de gasolina con el bioetanol obtenido. Por lo tanto, la demanda total ($TotalFuel_{m,t}$) en cada mercado m toma en cuenta el flujo de gasolina pura ($GasoPure_{m,t}$) y el flujo de gasolina en la mezcla ($FuelMix_{m,t}$). La mezcla de gasolina contiene un 20 % de bioetanol y un 80 % de gasolina. Esto puede ser modelado a través de las siguientes ecuaciones:

$$TotalFuel_{m,t} = GasoPure_{m,t} + FuelMix_{m,t}, \forall m \in M, t \in T \quad (4.21)$$

Las siguientes ecuaciones establecen el porcentaje de bioetanol en la mezcla ($GBioethanol_{m,t}$):

$$FuelMix_{m,t} \cdot 0.2 = GBioethanol_{m,t}, \forall m \in M, t \in T \quad (4.22)$$

La siguiente expresión determina el flujo de gasolina de acuerdo al porcentaje en la mezcla gasolina- bioetanol:

$$FuelMix_{m,t} \cdot 0.8 = GasoMix_{m,t}, \forall m \in M, t \in T \quad (4.23)$$

Por lo tanto, la demanda total es cubierta con el uso de gasolina pura y un porcentaje de gasolina en la mezcla, por lo tanto la expresión para el flujo total de gasolina es la siguiente:

$$TotalGasoline_{m,t} = GasoPure_{m,t} + GasoMix_{m,t}, \forall m \in M, t \in T \quad (4.24)$$

Se establecen los límites máximos ($TotalFuel_{m,t}^{MAX}$) y mínimos ($TotalFuel_{m,t}^{MIN}$) en la demanda de cada mercado para asegurar el nivel de cobertura en la demanda de combustibles.

$$TotalFuel_{m,t}^{MIN} \leq TotalFuel_{m,t} \leq TotalFuel_{m,t}^{MAX}, \forall m \in M, t \in T \quad (4.25)$$

Distribución del combustible sólido de las plantas de procesamiento a los mercados considerados. El combustible sólido obtenido en las plantas distribuidas y centrales puede ser enviado a los $n2$ mercados considerado:

$$FFuelSolid_{p,t}^{Plant} = \sum_{n2 \in N2} gSolidFuel_{p,n2,t}^{Plant}, \forall l \in L, t \in T \quad (4.26)$$

El flujo total de combustible sólido en cada Mercado es determinado a través de la siguiente expresión:

$$\sum_{p \in P} gSolidFuel_{p,n2,t}^{Plant} = GSolidFuel_{n2,t}, \forall n2 \in N2, t \in T \quad (4.27)$$

Se establecen restricciones en los límites máximos y mínimos en la demanda de combustible sólido de cada mercado:

$$GSolidFuel_{n2,t}^{MIN} \leq GSolidFuel_{n2,t} \leq GSolidFuel_{n2,t}^{MAX}, \forall n2 \in N2, t \in T \quad (4.28)$$

Costos de procesamiento en plantas. La siguiente ecuación es usada para calcular los costos de operación de las plantas distribuidas y centrales considerando la serie de etapas dentro de la planta:

$$CostPlant^{OP} = \sum_{j \in J} \left(\begin{array}{l} CoperPlant_p^{Mill} + CoperPlant_p^{Reactor} + CoperPlant_p^{Reactor2} + \\ CoperPlant_p^{Sieve} + CoperPlant_p^{Sieve2} + CoperPlant_p^{Tank} + \\ CoperPlant_p^{Tank2} + CoperPlant_p^{Column} + CoperPlant_p^{Column2} + \\ CoperPlant_p^{TankA} \end{array} \right) \quad (4.29)$$

$\forall p \in P$

Donde, los costos de operación para las diferentes etapas de procesamiento consideradas se obtienen por la multiplicación de un costo unitario de operación por el flujo total procesado en cada unidad:

$$CoperPlant_p^{Mill} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpMill} \cdot FTotalBag_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.30)$$

$$CoperPlant_p^{Reactor} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpReactor} \cdot FMill_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.31)$$

$$CoperPlant_p^{Reactor2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpReactor2} \cdot Ffilt2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.32)$$

$$CoperPlant_p^{Sieve2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpSieve2} \cdot FReact2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.33)$$

$$CoperPlant_p^{Sieve} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpSieve} \cdot FReact_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.34)$$

$$CoperPlant_p^{Tank} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpTank} \cdot (Ffilt1_{p,t}^{Plant} + FJuice_{p,t}^{Plant}), \forall p \in P \quad (4.35)$$

$$CoperPlant_p^{Tank2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpTank2} \cdot FFerment_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.36)$$

$$CoperPlant_p^{Column} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpColumn} \cdot FCol1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.37)$$

$$CoperPlant_p^{Column2} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpColumn2} \cdot FCol2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.38)$$

$$CoperPlant_p^{TankA} = \sum_{t \in T} UCostPlant_p^{OpTankA} \cdot FStock_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.39)$$

De igual manera, se calculan los costos de capital de cada una de las plantas de procesamiento, donde se toma en cuenta el costo fijo de cada una de las unidades considera:

$$CostPlant^{CAP} = K_F \sum_{p \in P} \left(\begin{aligned} &CPlant_p^{Mill} + CPlant_p^{Reactor} + CPlant_p^{Reactor2} \\ &+ CPlant_p^{Sieve} + CPlant_p^{Sieve2} + CPlant_p^{Tank} \\ &+ CPlant_p^{Column} + CPlant_p^{Column2} + CPlant_p^{TankA} \end{aligned} \right) \quad \forall p \in P \quad (4.40)$$

Los costos de capital para cada una de las unidades son modeladas a través de una disyunción. Por lo tanto, se define la variable binaria y_p^{Plant} , la cual es utilizada para determinar la localización óptima de las plantas distribuidas y centrales consideradas. Para cada una de las plantas de procesamiento se establecen restricciones adiciones con respecto

a la capacidad, con la finalidad de establecer un límite máximo en el flujo de material de procesamiento.

$$FTotBagCAP_p^{Plant} \geq FTotBag_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.41)$$

$$FMillCAP_p^{Plant} \geq FMill_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.42)$$

$$Ffilt2CAP_p^{Plant} \geq Ffilt2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.43)$$

$$FReactCAP_p^{Plant} \geq FReact_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.44)$$

$$FReact2CAP_p^{Plant} \geq FReact2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.45)$$

$$FFermentCAP_p^{Plant} \geq FFerment_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.46)$$

$$FCol1CAP_p^{Plant} \geq FCol1_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.47)$$

$$FCol2CAP_p^{Plant} \geq FCol2_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.48)$$

$$FStockCAP_p^{Plant} \geq FStock_{p,t}^{Plant}, \forall p \in P, t \in T \quad (4.49)$$

$$\left[\begin{array}{l} Y_p^{Plant} \\ FTotBagCAP_p^{Plant^{MIN}} \leq FTotBagCAP_p^{Plant} \\ FTotBagCAP_p^{Plant} \leq FTotBagCAP_p^{Plant^{MAX}} \\ CPlant_p^{Mill} = CFixPlant_p^{Mill} + CVarPlant_p^{Mill} \cdot FFTotBagCAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Reactor} = CFixPlant_p^{Reactor} + CVarPlant_p^{Reactor} \cdot FMillCAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Reactor2} = CFixPlant_p^{Reactor2} + CVarPlant_p^{Reactor2} \cdot Ffilt2CAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Sieve} = CFixPlant_p^{Sieve} + CVarPlant_p^{Sieve} \cdot FReactCAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Sieve2} = CFixPlant_p^{Sieve2} + CVarPlant_p^{Sieve2} \cdot FReact2CAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Tank} = CFixPlant_p^{Tank} + CVarPlant_p^{Tank} \cdot FFermentCAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Column} = CFixPlant_p^{Column} + CVarPlant_p^{Column} \cdot FCol1CAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{Column2} = CFixPlant_p^{Column2} + CVarPlant_p^{Column2} \cdot FCol2CAP_p^{Plant} \\ CPlant_p^{TankA} = CFixPlant_p^{TankA} + CVarPlant_p^{TankA} \cdot FStockCAP_p^{Plant} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{l} \neg Y_p^{Plant} \\ FTotBagCAP_p^{Plant} = 0 \\ CPlant_p^{Mill} = 0 \\ CPlant_p^{Reactor} = 0 \\ CPlant_p^{Reactor2} = 0 \\ CPlant_p^{Sieve} = 0 \\ CPlant_p^{Sieve2} = 0 \\ CPlant_p^{Tank} = 0 \\ CPlant_p^{Column} = 0 \\ CPlant_p^{Column2} = 0 \\ CPlant_p^{TankA} = 0 \end{array} \right], \forall p \in P \quad (4.50)$$

La variable binaria y_p^{Plant} (la cual representa a la variable Booleana en la disyunción), toma el valor de uno cuando la planta central o distribuida es instalada, en caso contrario, toma el valor de cero. Además, se establecen restricciones adicionales el flujo total de procesamiento en cada planta, el cual debe estar dentro de los límites máximos y mínimos considerados:

$$FTotBag_p^{Plant^{MIN}} \cdot y_p^{Plant} \leq FTotBagCAP_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.51)$$

$$FTotBagCAP_p^{Plant} \leq FTotBagCAP_p^{Plant^{MAX}} \cdot y_p^{Plant}, \forall p \in P \quad (4.52)$$

Por lo tanto, la variable binaria y_p^{Plant} es utilizada para el cálculo de los costos de capital de cada una de las unidades involucradas, donde la parte fija de los costos de capital es multiplicada por la variable binaria y la parte variables es igual a un costo unitario multiplicado por el flujo de material a procesar en cada unidad.

Costos de Transporte.

En esta sección se describe como se obtienen los costos de transporte para cada una de las alternativas de transporte consideradas w (Ejemplo, tanque, tren, y ducto).

Costos de Transporte de las áreas de cultivo i a las plantas distribuidas j . Para el cálculo de los costos asociados al transporte bagazo desde las áreas de cultivo i a plantas distribuidas j se define la variable Booleana $Y_{i,j,w}^{TDIS}$. Por lo tanto, cuando la variable toma el valor de uno, son activados los costos asociados a esa ruta de transporte, considerando sólo una posible ruta:

$$\bigvee_{w \in W} \left[Y_{i,j,w}^{TDIS} \cdot \left[CosTrans_{i,j} = \sum_{t \in T} CostUnitTrans_{i,j,w} \cdot FLeavBag_{i,j,t}^{Distributed} \right] \right] \forall i \in I, j \in J \quad (4.53)$$

$$\sum_{w \in W} Y_{i,j,w}^{TDIS} \leq 1, \forall i \in I, j \in J \quad (4.54)$$

Las variables continuas involucradas en la disyunción son desagregadas de la siguiente forma:

$$FLeavBag_{i,j,t}^{Distributed} = \sum_{w \in W} DFLeavBag_{i,j,t,w}^{Distributed}, \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (4.55)$$

$$CostTrans_{i,j} = \sum_{w \in W} DCostTrans_{i,j,w}, \forall i \in I, j \in J \quad (4.56)$$

La formulación en términos de las variables desagregadas se establece como sigue:

$$DCostTrans_{i,j,w} = \sum_{t \in T} CostUnitTrans_{i,j,w} \cdot DFLeavBag_{i,j,t,w}^{Distributed}, \forall i \in I, j \in J, w \in W \quad (4.57)$$

Se definen restricciones en los límites máximos y mínimos para las variables desagregadas involucradas:

$$DFLeavBag_{i,j,t,w}^{Distributed} \leq FLeavesBag_{i,j,t,w}^{Distributed}^{MAX} \cdot y_{i,j,w}^{TDIS}, \forall i \in I, j \in J, t \in T, w \in W \quad (4.58)$$

$$DCostTrans_{i,j,w} \leq CostTrans_{i,j,w}^{MAX} \cdot y_{i,j,w}^{TDIS}, \forall i \in I, j \in J, w \in W \quad (4.59)$$

La metodología anterior para el cálculo de los costos de transporte es aplicada a los costos de transporte restantes (como transporte de bagazo de las áreas de cultivo i a las plantas centrales l , costos de transporte de bagazo de las industria tequilera k a las plantas distribuidas j y plantas centrales l , costos de transporte de los productos obtenidos en plantas distribuidas j y plantas centrales l a los mercados m)

Función objetivo Económica.

La función objetivo económica corresponde a la maximización de la ganancia total, la cual toma en cuenta las ventas totales menos los costos involucrados. Los costos totales toman en cuenta los costos de operación, los costos de capital y los costos de transporte, tal como se muestra a continuación:

$$TotCost = \left(\begin{aligned} &CostDist^{OP} + CostDist^{CAP} + CostCent^{OP} + CostCent^{CAP} + \\ &\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} CostTrans_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} CostFixTrans_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} CostTrans_{i,l} + \\ &\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} CostFixTrans_{i,l} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} CostTrans_{k,j} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} CostFixTrans_{k,j} + \\ &\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} CostTrans_{k,l} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} CostFixTrans_{k,l} + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} CostTrans_{l,m} + \\ &\sum_{l \in L} \sum_{m \in M} CostFixTrans_{l,m} + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} CostTrans_{j,m} + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} CostFixTrans_{j,m} + \\ &\sum_{m \in M} \sum_{n1 \in N1} CostTrans_{m,n1} + \sum_{m \in M} \sum_{n1 \in N1} CostFixTrans_{m,n1} \end{aligned} \right) \quad (4.60)$$

Para el caso de las ventas totales, se consideran las ventas de los productos obtenidos, las cuales incluyen las ventas del bioetanol, las ventas del combustible sólido y las ventas de gasolina. En este caso, el flujo de cada uno de los productos es multiplicado por un factor β_m , el cual representa el precio unitario para cada uno de los productos:

$$TotSales = \left(\begin{aligned} &\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} GBioethanol_{m,t} \cdot \beta_m^{Bioethanol} + \\ &\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} GSolidFuel_{m,t} \cdot \beta_m^{SolidFuel} + \\ &\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} TotalGasoline_{m,t} \cdot \beta_m^{Gasoline} \end{aligned} \right) \quad (4.61)$$

Finalmente, la función económica se basa en maximizar la ganancia total anual, el cual representa la diferencia entre las ventas totales menos los costos totales:

$$PROFIT = TotSales - TotCost \quad (4.62)$$

Función Objetivo Ambiental.

La función objetivo ambiental corresponde a la minimización del impacto ambiental medido a través de la metodología del Eco-indicador 99. En particular, para esta investigación se consideraron las tres principales categorías de impacto como, daños al ecosistema, daños a la salud humana y daños a los recursos. Para el análisis del ciclo de vida se consideraron las actividades de mayor impacto ambiental a lo largo de la cadena de

suministro, como lo son las actividades de transporte, la producción de bioetanol y el uso y quema de la gasolina.

Daños asociados con el transporte. El impacto ambiental asociado con el transporte considera el transporte de la materia prima de las áreas de cultivo y la industria tequilera, a las plantas distribuidas y centrales:

$$\begin{aligned}
 ImpactTransp_{Bagasse} = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} FLeavBag_{i,j,t}^{Distributed} + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} FLeavBag_{i,l,t}^{Central} + \\
 & \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} FBagTequila_{k,j,t}^{Distributed} + \\
 & \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} FBagTequila_{k,l,t}^{Central}
 \end{aligned} \tag{4.63}$$

En la ecuación anterior, $ImpactTransp_{Bagasse}$ representa impacto asociado con el transporte de la materia prima, mientras que $\delta_{Transport}$ es el parámetro que representa el daño causado por unidad de masa transportada entre dos puntos. Este parámetro se obtiene a partir de la base de datos de eco-invent.

El impacto ambiental asociado con el transporte de productos desde las plantas distribuidas y centrales a los mercados se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 ImpactTransp_{Products} = & \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} gprodBioet_{j,m,t}^{Distributed} + \\
 & \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} gprodBioet_{l,m,t}^{Central} + \\
 & \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} TotalGasoline_{m,t}
 \end{aligned} \tag{4.64}$$

El impacto ambiental para la producción del bioetanol se calcula de la siguiente forma:

$$ImpactPlant_{Plant} = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \delta_{Plant} FStock_{p,t}^{Plant} \tag{4.65}$$

$ImpactPlant_{Plant}$ representa el impacto ambiental de la producción de bioetanol, donde se considera el impacto de todas las etapas consideradas en el proceso (molienda,

hidrolisis, fermentación, destilación). El impacto ambiental para la gasolina toma en cuenta el daño asociado con la producción y el daño por el transporte:

$$ImpactGasoline = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \delta_{Gasoline} TotalGasoline_{m,t} + \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \delta_{Transport} TotalGasoline_{m,t} \quad (4.65)$$

El impacto ambiental total toma en cuenta la suma de todos los daños descritos en las ecuaciones previas:

$$EnvImpact = ImpactTransp_{Bagasse} + ImpactTransp_{Products} + ImpactPlant_{Plant} + ImpactGasoline \quad (4.66)$$

Para la solución de este modelo multi-objetivo se considera el método *epsilon-constraint* para general la curva Pareto de los dos objetivos considerados.

4.4 RESULTADOS OBTENIDOS

El caso de estudio propuesto para mostrar la aplicabilidad del modelo matemático formulado se muestra en la Figura 4.1. Para la determinación de la cadena de suministro óptima se considera que puede presentar la instalación de diferentes plantas de procesamiento centrales y/o distribuidas, así como el bagazo de las diferentes áreas de cultivo y las industrias tequileras existentes. La información relacionada con el cultivo y disponibilidad del agave se obtuvo al igual que en el caso de estudio del Capítulo 3, de la SAGARPA. Se consideraron diferentes alternativas para transporte tanto de materias primas como de productos obtenidos en las plantas de procesamiento distribuidas y/o centrales, como, carretera libre, sistema ferroviario y carretera de cuota. El impacto ambiental se cuantificó siguiendo la metodología del Eco indicador, y para los datos sobre el análisis LCA se recurrió a la base de datos de Eco-invent, Los datos obtenidos, se muestran en la Tabla 4.1. La base de datos de Eco-invent, es una base a nivel mundial en la cual se encuentran reportados una serie de inventarios sobre las diferentes metodologías del análisis del ciclo de vida. En esta base de datos se encuentran reportados datos de diferentes áreas, como de agricultura, suministro de energía, transporte, obtención y uso de biocombustibles, venta y producción de productos químicos, sistemas de construcción, procesamiento de metales, electrónica, así como tratamiento de residuos, esta base de datos ofrece una amplia gama de datos internacionales para el análisis del LCA.

Tabla 4.1. Datos Obtenidos en la Base de Datos de Eco-Invent para el Análisis LCA.

Actividad (unidades)	Daños al Ecosistema (PDF m² años)	Daños a la Salud Humana (DALYs)	Daños a los Recursos (MJ)
Transporte (TKM)	0.001598	0.0050235	0.0082522
Producción de Bioetanol (kg bioetanol)	0.0005665	0.007843	0.031235
Gasolina (kg gasolina)	0.001685	0.021228	0.18986

Las actividades consideradas en la Tabla 4.1 representan las actividades que presentan un mayor impacto ambiental a lo largo de la cadena de suministro, como lo son las actividades de transporte, donde se considera el impacto ambiental de acuerdo a la cantidad de material a transportar, así como el combustible utilizado por el sistema de transporte. Para el caso de la producción del bioetanol, se considera las etapas de procesamiento con mayor impacto dentro de cada planta, como son las etapas de molienda y las etapas de destilación debido a la gran cantidad de energía que es necesario suministrar. Finalmente, en la gasolina se considera el impacto ambiental por la producción y el uso de acuerdo a la cantidad enviada a cada mercado. Los costos unitarios de transporte fueron obtenidos de la información disponible por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2014). La demanda de gasolina en los distintos mercados se obtuvieron de acuerdo a los datos reportados por la Secretaría de Energía (SENER, 2013).

El modelo MILP fue codificado en los software GAMS (Brooke et al., 2014). El modelo matemático MILP presenta 36,410 variables continuas, 1,224 variables binarias y 35,414 restricciones, el modelo se resolvió utilizando con el resolutor CPLEX. Para ilustrar el funcionamiento del modelo, se propusieron diferentes escenarios. En particular, para facilitar el análisis de los resultados, el modelo fue resuelto a través de serie de problemas con dos criterios, en los cuales se refleja el criterio económico evaluado contra cada categoría

de impacto por separado. Cada modelo fue resuelto mediante el método *épsilon-constraint*, donde en cada modelo es mantenido el aspecto económico en la función objetivo y al criterio ambiental se le es asignada una restricción auxiliar.

4.4.1. Escenario 1, cadena de suministro considerando los aspectos económicos y la minimización del impacto ambiental en daños al ecosistema.

En este escenario se toman en cuenta dos objetivos; la función objetivo económica y la función objetivo ambiental asociados a los daños al ecosistema. Para la solución de este caso de estudio se proponen dos opciones: (i) satisfacer con la demanda total de combustibles y (ii) satisfacer sólo el 50% de la demanda total.

Escenario 1a (Satisfacer con la demanda total de combustibles). En este escenario se considera que la demanda total de biocombustibles es totalmente satisfecha. En la Figura 4.4 se muestra la curva Pareto de los puntos obtenidos mediante el método *épsilon-constraint*. Se toman en cuenta tres soluciones para el análisis, ya que podrían ser particularmente atractivas para la toma de decisiones a nivel económico y ambiental. En primer lugar, se toma en cuenta el punto A, el cual representa la solución con el menor impacto ambiental en la categoría de daños al ecosistema, así como el menor beneficio a nivel económico. En la Figura 4.5, se muestra la configuración de la cadena de suministro obtenida para este punto, mientras que en la Tabla 4.2, se muestra los flujos correspondientes a cada una de las unidades involucradas. En esta solución, las plantas de procesamiento centrales y distribuidas que son instaladas presentan una producción de 1.35×10^8 kg/año de bioetanol.

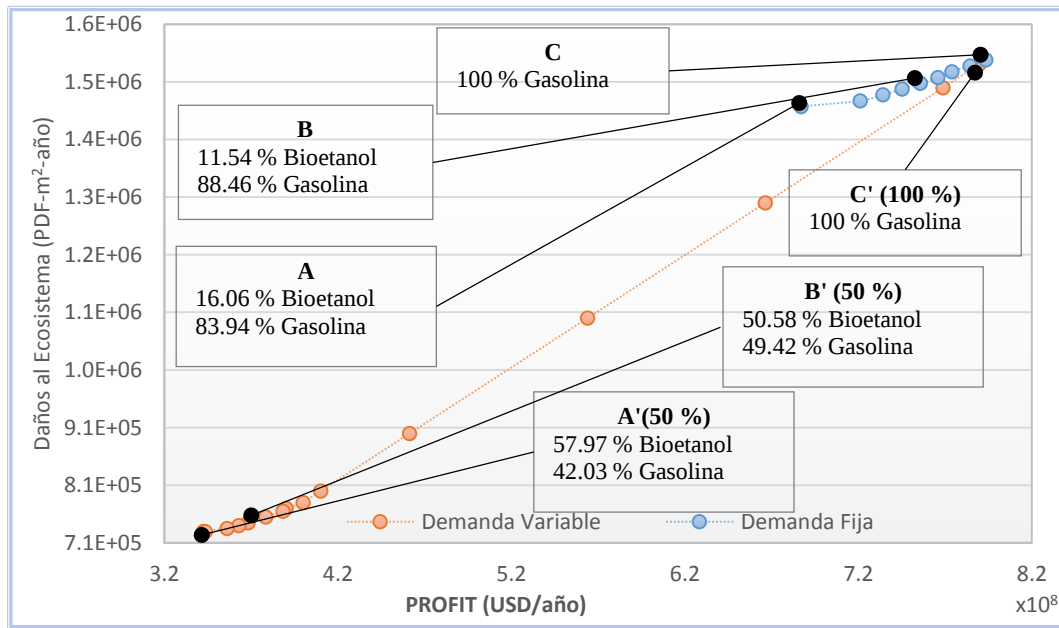


Figura 4.4. Curva Pareto para la Minimización del Impacto Ambiental Considerando los Daños al Ecosistema, Tomando en Cuenta la Demanda Fija y Variable de Combustibles.

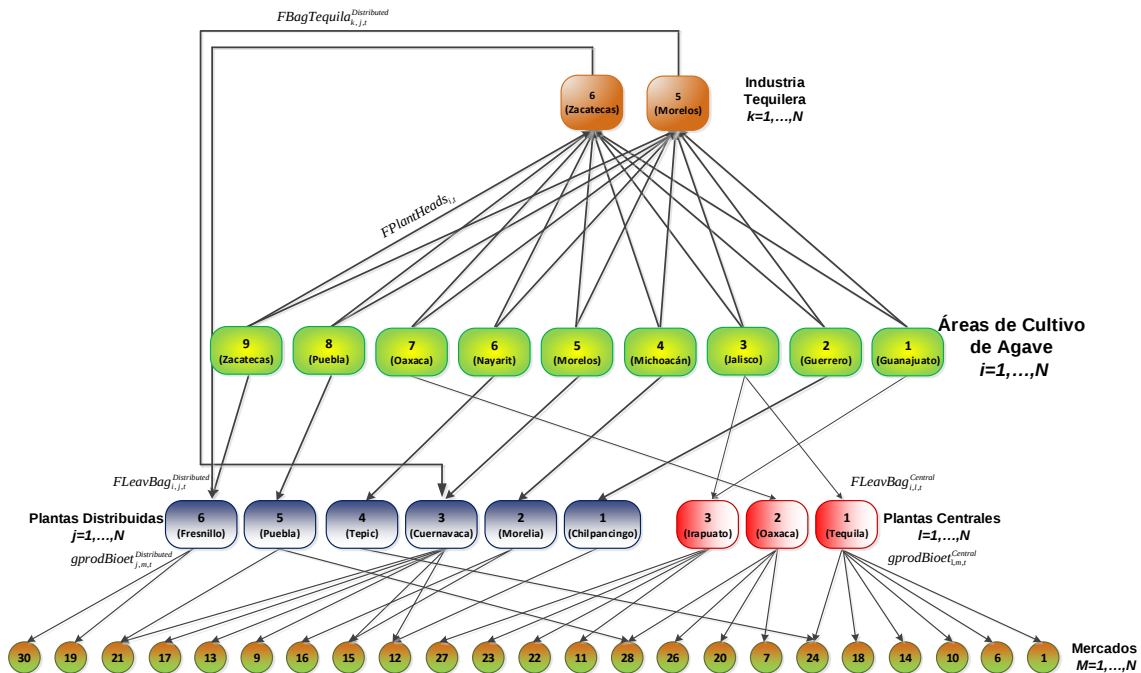


Figura 4.5. Cadena de Suministro para la Solución del Punto A del Escenario 1a.

Tabla 4.2. Flujos Correspondientes de la Cadena de Suministro del Punto A del Escenario 1a.

<i>Planta Central</i>	<i>Flujo de bagazo de áreas de cultivo (kg/año)</i>	<i>Flujo de bagazo de la industria tequilera (kg/año)</i>	<i>Bioetanol obtenido (kg/año)</i>	<i>Mercados considerados</i>
1	3. 6.77x10 ⁷	-	2.13x10 ⁷	1. Aguascalientes, 6. Colima, 10. Durango, 14. Jalisco, 18. Nayarit, 24. Sinaloa.
2	7. 5.97x10 ⁷	-	1.88x10 ⁷	7. Chiapas, 20. Oaxaca, 26. Tabasco, 28. Veracruz.
3	1. 3.54x10 ⁷ , 3. 3.25x10 ⁷	-	2.13x10 ⁷	11. Guanajuato, 22. Querétaro, 23. San Luis Potosí, 27. Tamaulipas.
<i>Planta Distribuida</i>				
1	2. 2.57x10 ⁶	-	8.09x10 ⁵	12. Guerrero.
2	4. 2.69x10 ⁷	-	8.45x10 ⁶	15. México, 16. Michoacán.
3	5. 6.72x10 ⁶	5. 1.41x10 ⁸	4.64x10 ⁷	9. Distrito Federal, 12. Guerrero, 13. Hidalgo, 15. México, 17. Morelos, 21. Puebla.
4	6. 1.46x10 ⁷	-	4.59x10 ⁶	24. Sinaloa.
5	8. 1.01x10 ⁷	-	3.20x10 ⁶	21. Puebla, 28. Veracruz.
6	9. 1.18x10 ⁷	6. 1.98x10 ⁷	1.0x10 ⁷	19. Nuevo León, 30. Zacatecas

El punto B de la curva Pareto representa una solución intermedia, en este punto la producción de bioetanol disminuye mientras que la cantidad de gasolina necesaria para satisfacer la demanda de combustibles aumenta. En la Figura 4.6 se muestra la cadena de suministro asociada a este punto, mientras que en la Tabla 4.3 se muestran los flujos

asociados a esta cadena de suministro. La ganancia total para esta solución es 7.5573×10^8 USD/año, mientras que la cantidad total de bioetanol producido es 4.84×10^7 kg/año.

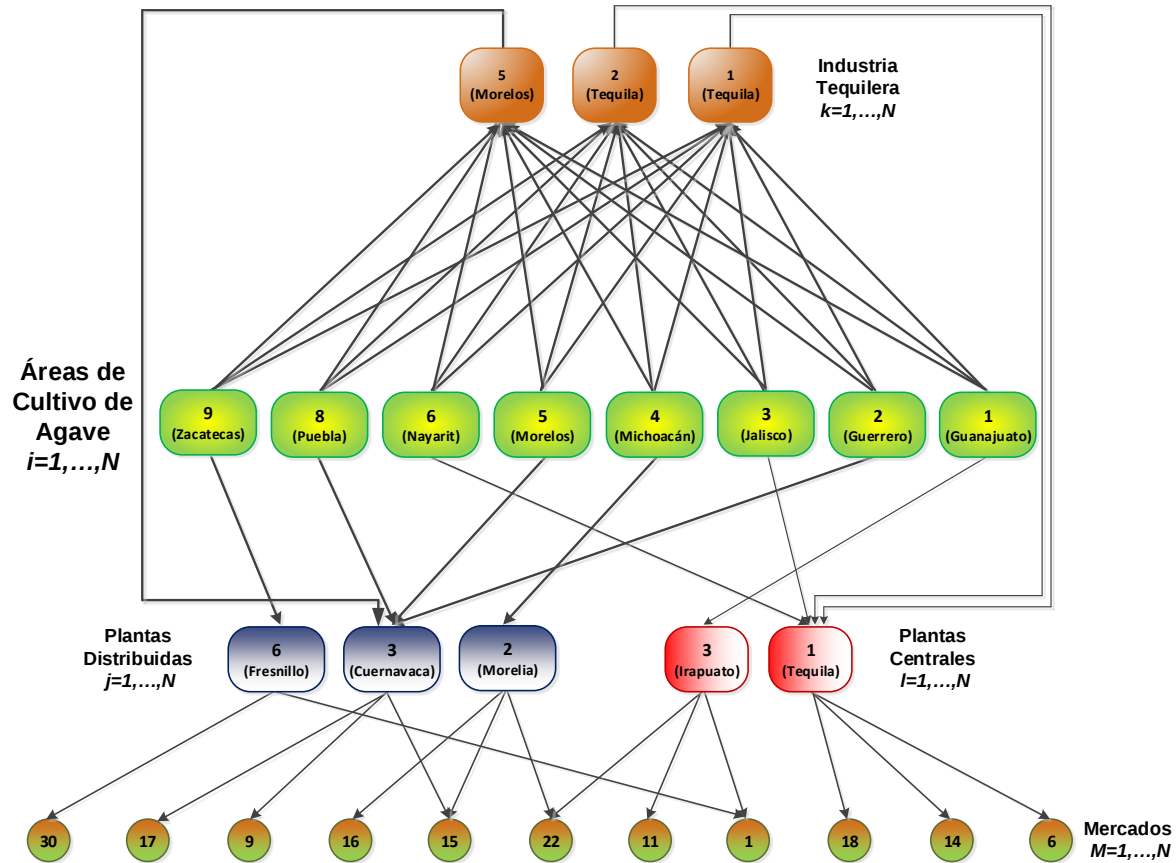


Figura 4.6. Cadena de Suministro para la Solución del Punto B del Escenario 1a.

Finalmente, la solución en el punto C representa la solución que contiene la máxima ganancia, pero presenta el mayor impacto ambiental en daños al ecosistema. En esta solución, la demanda de combustible está cubierta totalmente con gasolina pura, es decir, sólo consideran las ventas de gasolina, presentado una ganancia total de 7.9346×10^8 USD/año.

Tabla 4.3. Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B del Escenario 1a.

<i>Planta Central</i>	<i>Flujo de bagazo de las áreas de cultivo (kg/año)</i>	<i>Flujo de bagazo de la industria tequilera (kg/año)</i>	<i>Bioetanol obtenido (kg/año)</i>	<i>Mercados considerados</i>
1	3. 6.87x10 ⁵ 6. 2.06x10 ⁶	1. 1.67x10 ⁷ 2. 1.23x10 ⁷	9.99x10 ⁶	6. Colima, 14. Jalisco, 18. Nayarit.
3	1. 3.54x10 ⁷	-	1.11x10 ⁷	1. Aguascalientes, 11. Guanajuato, 22. Querétaro.
<i>Planta Distribuida</i>				
2	4. 2.69x10 ⁷	-	8.45x10 ⁶	15. México, 16. Michoacán, 22. Querétaro.
3	2. 2.57x10 ⁶ 5. 6.72x10 ⁶ 8. 1.01x10 ⁷	5. 2.87x10 ⁷	1.51x10 ⁷	9. Distrito Federal, 15. México, 17. Morelos.
6	9. 1.18x10 ⁷	-	3.72x10 ⁶	1. Aguascalientes, 30. Zacatecas

Escenario 1b (Demanda variable). Para la solución de este escenario, el modelo fue resuelto tomando en cuenta límites superior e inferior en la demanda. La Figura 4.4, muestra la curva de Pareto considerando también la demanda variable. En este caso, el punto A' de la curva Pareto presenta que la demanda fue satisfecha principalmente con gasolina y sólo es producido una pequeña cantidad de bioetanol. En la sección final (en el lado izquierdo), la curva de Pareto muestra un comportamiento elíptico, el cual indica que la instalación de plantas de procesamiento centrales y distribuidas, es por esta razón que las ganancias disminuyen al mismo tiempo que disminuye el impacto ambiental asociado con los daños al ecosistema debido a la instalación de plantas para la producción de bioetanol. El punto A' muestra la solución con la mínima ganancia (3.43×10^8 USD/año), pero también el menor impacto ambiental. En este punto, la demanda de biocombustibles satisfecha es de un 50%, con una producción total de bioetanol de 6.54×10^7 kg/año. Por otro lado, la solución del punto C' muestra la solución con la mayor ganancia, este punto toma en cuenta que la demanda de

combustibles es satisfecha sólo con el flujo de gasolina, que presenta una ganancia de 7.89×10^8 USD/año con un porcentaje de demanda satisfecha del 2.3% de la demanda total de combustible en los mercados considerados. En la Figura 4.7 se presenta la cadena de suministro asociada a la solución del punto B', que presenta un beneficio de 3.901×10^8 USD/año y el flujo total bioetanol producido es de 4.81×10^6 kg/año, en la Tabla 4.4, se muestra los flujos asociados a la cadena de suministro determinada.

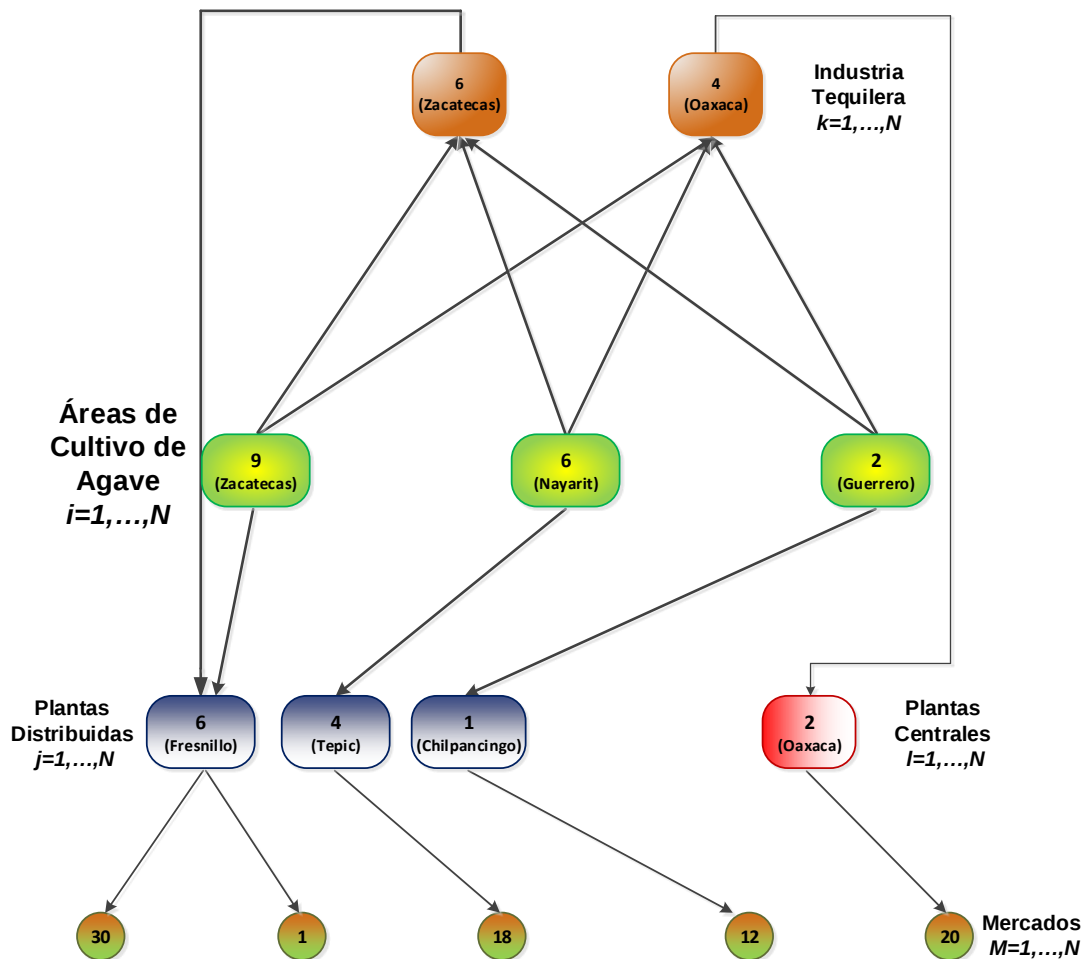


Figura 4.7. Cadena de Suministro para la Solución del Punto B' del Escenario 1b.

Tabla 4.4. Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B' del Escenario 1b.

<i>Planta Central</i>	<i>Flujo de bagazo de las áreas de cultivo (kg/año)</i>	<i>Flujo de bagazo de la industria tequilera (kg/año)</i>	<i>Bioetanol obtenido (kg/año)</i>	<i>Mercados considerados</i>
2	-	4. 4.75x10 ⁶	1.49x10 ⁶	20. Oaxaca.
Planta Distribuida				
1	2. 2.57x10 ⁶	-	8.09x10 ⁵	12. Guerrero.
4	6. 1.55x10 ⁶	-	4.86x10 ⁵	18. Nayarit.
6	9. 5.44x10 ⁶	6. 9.86x10 ⁵	2.02x10 ⁶	1. Aguascalientes, 30. Zacatecas

4.4.2. Escenario 2, cadena de suministro considerando los aspectos económicos y el impacto ambiental asociado a los daños a la salud humana.

Este escenario considera la maximización de la ganancia y la minimización del impacto ambiental asociado a los daños a la salud humana, dejando de lado el impacto ambiental asociado con los daños a los recursos y la calidad del ecosistema. Se consideran dos opciones, la primera de ellas considera satisfacer una demanda fija y la segunda no presenta restricciones sobre el nivel de demanda satisfecha.

Escenario 2a (Satisfacer la demanda total de biocombustibles). En esta opción, el modelo de optimización multi-objetivo se resuelve considerando una demanda fija en todos los mercados. En la Figura 4.8 se muestra la curva Pareto obtenida para este caso escenario.

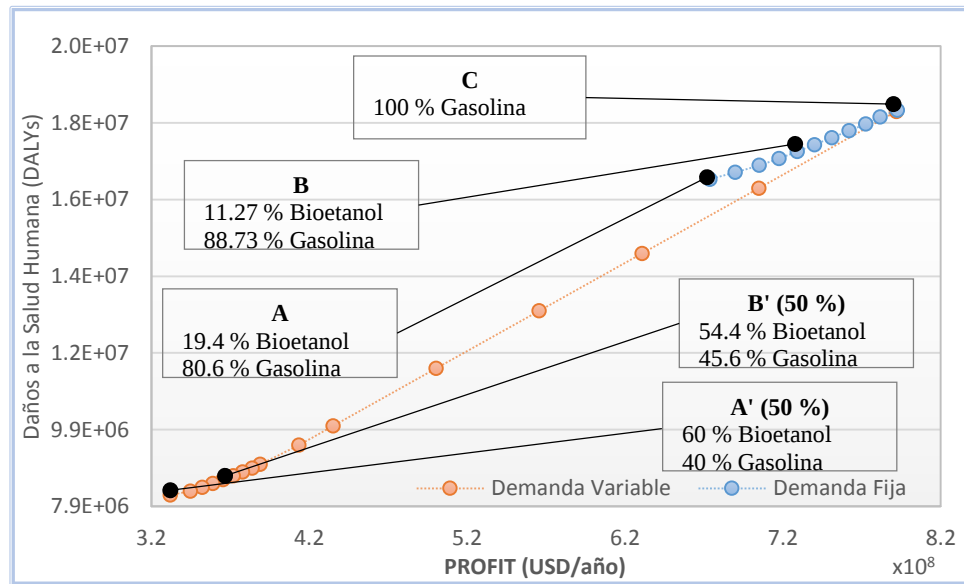


Figura 4.8. Curva Pareto Obtenida para el Escenario 2.

Para el análisis de este escenario se seleccionan tres soluciones de la curva Pareto de Figura 4.8. El Punto A representa la solución con el menor impacto ambiental asociado a los daños a la salud humana, pero al mismo tiempo presenta el menor beneficio económico. En la Figura 4.5 se muestra la cadena de suministro asociada al punto A, que tiene una ganancia de 6.6775×10^8 USD/año y una producción total de bioetanol de 1.68×10^8 kg/año. En esta figura se observa que esto es la misma configuración que se obtuvo en el caso de la minimización del impacto ambiental considerando los daños al ecosistema. Esta cadena de suministro, instala al número máximo de plantas centrales y distribuidas consideradas, debido a que para disminuir el impacto ambiental es necesario aumentar la producción de bioetanol de esta forma se reduce el consumo de gasolina.

El Punto B de la curva Pareto representa una solución intermedia, cuya configuración se presenta en la Figura 4.9. Esta configuración instala solamente dos plantas de procesamiento centrales y las ganancias totales de esta cadena de suministro son 7.29×10^8 USD/año, mientras que la cantidad de bioetanol producido es de 9.46×10^7 kg/año. En la Tabla 4.5, se muestra los flujos asociados a la cadena de suministro correspondiente a este punto.

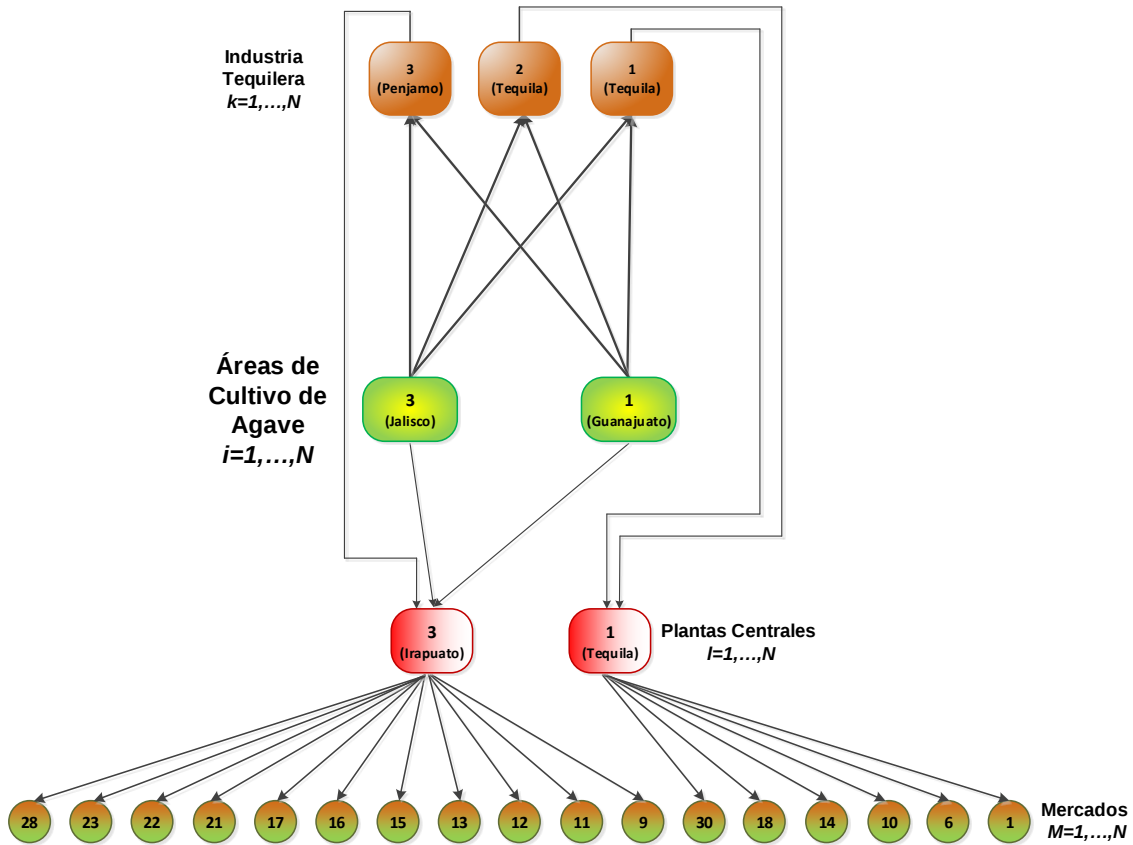


Figura 4.9. Cadena de Suministro para la Solución del Punto B del Escenario 2a.

Finalmente, la solución del Punto C presenta la máxima ganancia ya que es la solución donde la demanda se cubre solamente gasolina pura, que conduce al mayor impacto ambiental.

Escenario 2b (Demanda variable 50-10% de la demanda de combustibles). En la Figura 4.8 se muestra la curva Pareto (la línea con los puntos rojos representan el caso demanda variable) para el caso en el cual los límites máximos y mínimos son agregados a la demanda satisfecha. La curva Pareto muestra un comportamiento similar que en el caso del Escenario 1. Esto es porque la función objetivo ambiental considera las mismas fuentes de impacto ambiental (transporte, producción de bioetanol y gasolina uso), que se cuantifican con diversos factores de daño.

Tabla 4.5. Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B del Escenario 2a.

<i>Planta Central</i>	<i>Flujo de bagazo de las áreas de cultivo (kg/año)</i>	<i>Flujo de bagazo de la industria tequilera (kg/año)</i>	<i>Bioetanol obtenido (kg/año)</i>	<i>Mercados considerados</i>
1	-	1. 2.18×10^7 2. 4.84×10^7	2.21×10^7	1. Aguascalientes, 6. Colima, 10. Durango, 14. Jalisco, 18. Nayarit, 30. Zacatecas.
3	1. 3.54×10^7 3. 1.53×10^8	3. 4.25×10^7	7.25×10^7	9. Distrito Federal, 11. Guanajuato, 12. Guerrero, 13. Hidalgo, 15. México, 16. Michoacán, 17. Morelos, 21. Puebla, 22. Querétaro, 23. San Luis Potosi, 28. Veracruz.

4.4.3. Escenario 3, cadena de suministro considerando los aspectos económicos y el impacto ambiental asociado a los daños a los recursos.

Este Escenario 3 presenta la solución en donde se toma en cuenta la maximización de la ganancia total y la minimización del impacto ambiental asociado a los daños a los recursos. En la Figura 4.10 se muestra la curva Pareto asociada a este escenario (la línea de puntos azules, representa el caso con demanda variable y la línea de puntos rojos representa el caso de demanda fija en los mercados).

Escenario 3a (Satisfacer una demanda fija en los mercados considerados). La Figura 4.10 muestra la curva Pareto (demanda fija), donde se observa que la curva presenta un comportamiento pseudo lineal debido a que el impacto ambiental considerando los daños a los recursos es similar para el caso de la producción de bioetanol y el uso de gasolina. Por lo tanto, la demanda de cada mercado es satisfecha con gasolina, pero es posible reducir un poco el impacto ambiental cuando es producido el bioetanol en las plantas de procesamiento centrales y/o distribuidas consideradas.

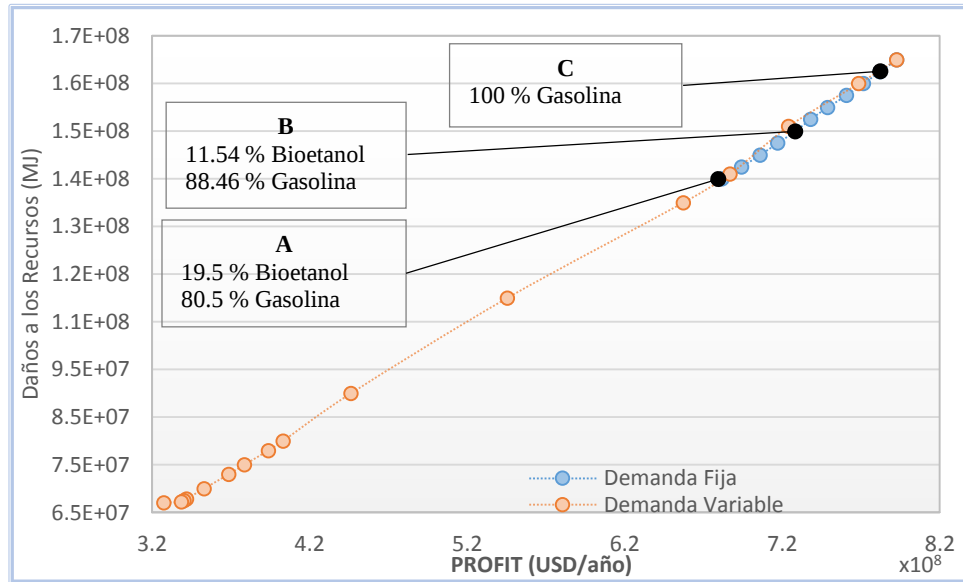


Figura 4.10. Curva Pareto Obtenida para el Escenario 3.

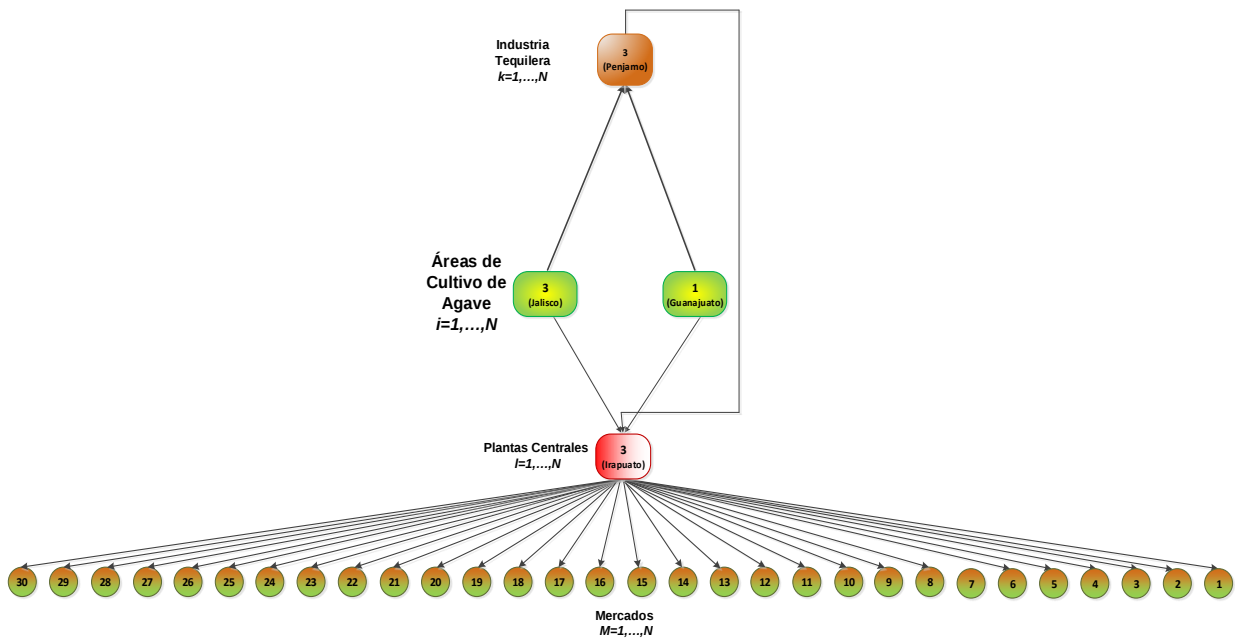


Figura 4.11. Cadena de Suministro para la Solución del Punto A del Escenario 3a.

En la mayoría de los puntos de la curva Pareto, la solución establece la instalación de sólo una planta central, pero sólo varía la cantidad de bioetanol producido para reducir el impacto

ambiental. En la Figura 4.11 se muestra la cadena de suministro para la solución del punto A de la curva Pareto, con una ganancia de 7.2829×10^8 USD/año. La planta central de la cadena de suministro produce 9.68×10^7 kg/año de bioetanol. En la Tabla 4.6 se muestran los flujos asociados a la cadena de suministro.

Tabla 4.6. Flujos Correspondientes a la Cadena de Suministro del Punto B del Escenario 2a.

<i>Planta Central</i>	<i>Flujo de bagazo de las áreas de cultivo (kg/año)</i>	<i>Flujo de bagazo de la industria tequilera (kg/año)</i>	<i>Bioetanol obtenido (kg/año)</i>	<i>Mercados considerados</i>
3	1. 3.54×10^7 3. 1.57×10^8	3. 1.15×10^8	9.68×10^8	Todos los mercados

Escenario 3b. Finalmente, el modelo fue resuelto tomando en cuenta una demanda variable. La curva Pareto de la Figura 4.10 muestra que la línea de puntos rojos, presenta un comportamiento casi lineal. Es decir, cuando se maximiza la ganancia, la demanda se satisface sólo con gasolina, mientras que la solución con el mínima impacto a los recursos satisface la demanda sólo con bioetanol.

En la Tabla 4.7 se presenta un resumen de los resultados analizados en todos los escenarios. En el caso de demanda variable, el porcentaje máximo de reducción del impacto ambiental es mayor porque la cadena de suministro no satisface plenamente la demanda en los mercados. Por esta razón, el uso de gasolina y bioetanol disminuye, y por lo tanto también el impacto ambiental.

Tabla 4.6. Resumen de las Escenarios Analizados.

Demanda Fija en los Mercados (Demanda Total Satisfecha)			
<i>Daños al Ecosistema Punto</i>	<i>Impacto Ambiental (PDF.m².año)</i>	<i>Ganancia (USD/año)</i>	<i>Porcentaje del impacto ambiental reducido entre los puntos A-C (%)</i>
A	1.4672X10 ⁶	6.8689X10 ⁸	5.2196
B	1.5076X10 ⁶	7.5573X10 ⁸	
C	1.548X10 ⁶	7.9346X10 ⁸	
<i>Daños a la salud Humana Punto</i>	<i>Impacto Ambiental (DALYs)</i>	<i>Ganancia (USD/año)</i>	<i>Porcentaje del impacto ambiental reducido entre los puntos A-C (%)</i>
A	1.6407X10 ⁷	6.6775X10 ⁸	10.0197
B	1.7154X10 ⁷	7.2919X10 ⁸	
C	1.8234X10 ⁷	7.9267X10 ⁸	
<i>Daños a los Recursos Punto</i>	<i>Impacto Ambiental (MJ)</i>	<i>Ganancia (USD/año)</i>	<i>Porcentaje del impacto ambiental reducido entre los puntos A-C (%)</i>
B	1.45X10 ⁸	7.2829X10 ⁸	15.625
Demanda Variable en los Mercados			
<i>Daños al Ecosistema Punto</i>	<i>Impacto Ambiental (PDF.m².año)</i>	<i>Ganancia (USD/año)</i>	<i>Porcentaje del impacto reducido entre los puntos A-C (%)</i>
A'	7.295X10 ⁵	3.4344X10 ⁸	52.629
B'	7.7X10 ⁵	3.9011X10 ⁸	
C'	1.54X10 ⁶	7.8937X10 ⁸	

Finalmente, en la Figura 4.12 se muestra los tres diagramas de dispersión que representan los puntos de la curva Pareto, considerando en cada espacio dos categorías de impacto. Como se puede observar, la minimización de una categoría de impacto resulta la minimización de las demás categorías de impacto, ya que todas las categorías de impacto están altamente correlacionadas.

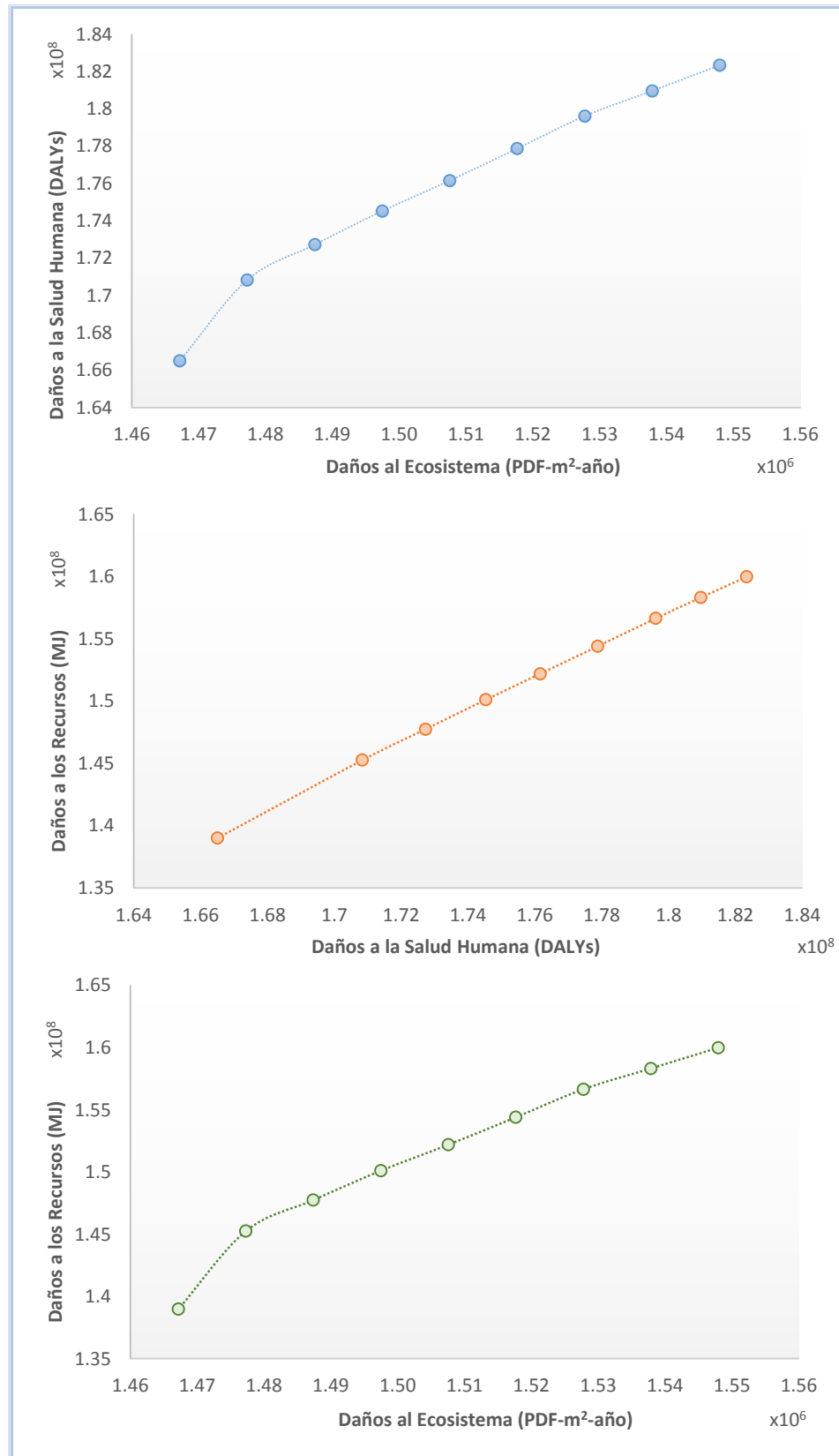


Figura 4.12. Correlaciones Entre las Categorías de Impacto Consideradas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones sobre este trabajo de investigación se basan en que ha sido posible proponer un modelo matemático para la de optimización de la configuración de una biorefinería considerando la disponibilidad de diferentes materias primas y la obtención de una diversidad de productos de alto valor agregado. Se propusieron diferentes escenarios para mostrar la aplicabilidad del modelo planteado. Los resultados obtenidos muestran que la optimización de la configuración de una biorefinería puede ser una forma factible de aplicación para considerar los diferentes tipos de biomasa disponibles en cierta región y de esta forma evaluar que productos pueden obtenerse de acuerdo a la demanda específica. Lo cual resulta ser atractivo a nivel económico y ambiental. Del caso de estudio analizado, el producto de mayor obtención es el biodiesel, y la materia prima con mayor potencial resulto ser la palma africana y el uso de micro-algas. Por lo tanto, el modelo muestra gran flexibilidad para la aplicación en diferentes casos de estudios y escenarios.

Para el caso de la optimización de la cadena de suministro para la obtención de bioetanol a partir de los residuos del agave, el modelo propuesto fue resuelto considerando diferentes escenarios. La solución de estos escenarios muestran que la producción de bioetanol resulta ser atractivo a nivel económico, ya que de esta forma pueden ser utilizados los residuos provenientes de la industria tequilera y de las áreas de cultivo de agave, disminuyendo un problema de contaminación ambiental, debido a que estos residuos no presentan ningún uso actualmente. En la solución del modelo no se presentaron complicaciones numéricas. La cadena de suministro encontrada para cada escenario muestra las ganancias que pueden obtenerse de acuerdo a la demanda de biocombustibles en cada región. El porcentaje que puede satisfacerse de acuerdo a la demanda total de combustibles es de aproximadamente el 1,04%, esto tomando en cuenta que las plantas de procesamiento trabajan de acuerdo a las planteadas con los datos de la planta piloto.

Para el caso de la optimización multi-objetivo para diseñar un sistema de biorefinería en México considerando los residuos de la industria tequilera. La formulación del modelo de

optimización presenta simultáneamente la maximización del beneficio económico y minimización de los impactos ambientales considerando los daños a la salud humana, los recursos y la calidad del ecosistema. Se cuantificó el impacto ambiental mediante la metodología Eco-indicador 99. El enfoque propuesto identifica la ubicación óptima de una biorefinería, así como la distribución de los productos obtenidos, además de la selección de las mejores alternativas de transporte. La metodología de optimización se aplicó para determinar la cadena de suministro para la obtención de biocombustibles de los residuos de la industria del tequila en México, donde se analizaron varias opciones de diseño. Los resultados (que se muestra a través de las curvas de Pareto) indican que la instalación de un sistema de biorefinería en México basado en el uso de residuos de la industria del tequila puede ofrecer soluciones atractivas en términos de desempeño económico y ambiental. El uso de residuos como materia prima conduce a beneficios ambientales significativos en comparación con el uso tradicional de los combustibles fósiles.

REFERENCIAS

- Aden A.; Ruth M.; Ibsen K.; Jechura J.; Neeves K.; Sheehan J.; Wallace B.; Montague L.; Slayton A.; Lukas J. *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory; **2002**. NREL/TP-510-32438.
- Agnihotri R.B.; Motard R.L. Reaction path synthesis in industrial chemistry. In: Squires RG, Reklaitis GV, eds. *Computer Applications to Chemical Engineering*. Vol 124. Washington, D. C.: American Chemical Society, **1980**:193-206.
- Alvarado-Morales M.; Gernaey K.V.; Woodley J.M.; Gani R. Synthesis, design and analysis of downstream separation in bio-refinery processes through a group-contribution approach. In: Pierucci S, Ferraris GB, eds. *Computer Aided Chemical Engineering*. Vol 28: 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE20). **2010**, 1147-1152.
- Bao, B.; Ng, D.K.S.; Tay, D.H.S.; Jiménez-Gutiérrez, A.; El-Halwagi, M.M. A shortcut method for the preliminary synthesis of process-technology pathways: An optimization approach and application for the conceptual design of integrated biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*. **2011**, In press.
- Brooke, A; Kendrick, D; Meeraus, A; Raman, R. GAMS A User's Guide. www.gams.com, Washington, D.C., GAMS Development Corporation, 2012.
- BIOENERCEL, Producción de biocombustibles a partir de material lignocelulósico, 2011.
- Buxton A.; Livingston A.G.; Pistikopoulos, E.N. Reaction path synthesis for environmental impact minimization. *Computers & Chemical Engineering*. **1997**, 21 (Supplement 1), S959-S964.

- Chouinard-Dussault, P.; Bradt, L.; Ponce-Ortega, J.M.; El-Halwagi, M.M. Incorporation of process integration into life cycle analysis for the production of biofuels. *Clean Technologies and Environmental Policy*, In press.
- Crabtree, E.W.; El-Halwagi, M.M. Synthesis of environmentally acceptable reactions. *AIChE Symposium Series*. **1994**, 90 (303), 117-127.
- Diwekar U. M. Introduction to Applied Optimization, Second Edition, Springer-Verlag, Cambridge, MA., 2008.
- Dutta A.; Dowe N.; Ibsen K.N.; Schell D.J.; Aden A. An economic comparison of different fermentation configurations to convert corn stover to ethanol using *Z. mobilis* and *Saccharomyces*. *Biotechnology Progress*, **2010**, 26 (1), 64-72.
- Elms R.D.; El-Halwagi M.M. Optimal scheduling and operation of biodiesel plants with multiple feedstocks. *Int. J. Process Systems Engineering*, **2009**, 1 (1), 1-28.
- Expósito-Fernández, María del Mar. Análisis de alternativas tecnológicas e ingeniería conceptual de una bioerfinería lignocelulósica. Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Química, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2008.
- Fernando S.; Adhikari S.; Chandrapal C.; Murali N. Biorefineries: Current status, challenges, and future direction. *Energy & Fuels*. **2006**, 20 (4), 1727-1737.
- Fornari T.; Rotstein E.; Stephanopoulos G. Studies on the synthesis of chemical reaction paths--II. Reaction schemes with two degrees of freedom. *Chemical Engineering Science*. **1989**, 44 (7), 1569-1579.
- Gosling I. Process simulation and modeling for industrial bioprocessing: tools and techniques. *Industrial Biotechnology*, **2005**, I (2), 106-109.
- Govind R.; Powers G.J. A chemical engineering view of reaction path synthesis. In: Wipke WT, Howe WJ, eds. *Computer-Assisted Organic Synthesis*. Vol 61. Washington, D. C.: American Chemical Society, **1977**, 81-96.
- Goyal H.B.; Seal D.; Saxena R.C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2008**, 12 (2), 504-517.
- Holladay J.E.; Bozell J.J.; White J.F.; Johnson D. *Top value-added chemicals from biomass. Volume II: Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin*: Pacific Northwest National Laboratory; **2007**. PNNL-16983.

- Holtzapple M.; Granda C. Carboxylate platform: The MixAlco process Part 1: Comparison of three biomass conversion platforms. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **2009**, 156 (1), 95-106.
- Huber G.W.; Iborra S.; Corma A. Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical Reviews*. **2006**, 106 (9), 4044-4098.
- Jones S.; Zhu Y.; Valkenburg C. *Municipal solid waste (MSW) to liquid fuels synthesis. Volume 2: A techno-economic evaluation of the production of mixed alcohols*. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory; **2009**. PNNL-18482.
- Kamm B.; Kamm M. Biorefineries – multi product processes. In: Ulber R, Sell D, eds. *White Biotechnology*. Springer, **2007**, 105, 175-204.
- Kazi F.; Fortman J.; Anex R.; Kothandaraman G.; Hsu D.; Aden A.; Dutta A. *Techno-economic analysis of biochemical scenarios for production of cellulosic ethanol*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory; **2010**. NREL/TP-6A2-46588.
- Li M.; Hu S.; Li Y.; Shen J. A hierarchical optimization method for reaction path synthesis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **2000**, 39 (11), 4315-4319.
- Lopez, Gerardo; Lopretti, Mary. Biomásica: Procesamiento sustentable de la biomasa para elaborar productos químicos y energía. Postulación para el premio MERCOSUR de ciencia y tecnología. 2009.
- May D.; Rudd D.F. Development of solvay clusters of chemical reactions. *Chemical Engineering Science*. **1976**, 31 (1), 59-69.
- Mohan T.; El-Halwagi M.M. An algebraic targeting approach for effective utilization of biomass in cogeneration systems through process integration. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **2007**, 9 (1), 13-25.
- Myint L.L.; El-Halwagi M.M. Process analysis and optimization of biodiesel production from soybean oil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **2009**, 11 (3), 263-276.
- Ng D.K.S.; Pham V.; El-Halwagi M.M.; Jiménez-Gutiérrez A.; Spriggs D.H. A hierarchical approach to the synthesis and analysis of integrated biorefineries. Paper presented at: 7th International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD 2009): Design for Energy and the Environment **2009**; Breckenridge, Colorado.

- Nishida N.; Stephanopoulos G.; Westerberg A.W. A review of process synthesis. *AIChE Journal*. **1981**, 27 (3), 321-351.
- Oliva-Dominguez, Jose Miguel. Efecto de los productos de degradacion originados en la explosion por vapor de biomasa de chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biologicas, 2003.
- Pham V.; El-Halwagi M.M. Process synthesis and optimization of biorefinery configurations. *AIChE Journal*, **2011**, In press. DOI: 10.1002/aic.12640.
- Pham V.; Holtzapple M.; El-Halwagi M.M. Techno-economic analysis of biomass to fuels conversion via the MixAlco process. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **2010**, 37 (11), 1157-1168.
- Phillips S.; Aden A.; Jechura J.; Dayton D.; Eggeman T. *Thermochemical ethanol via indirect gasification and mixed alcohol synthesis of lignocellulosic biomass*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory; **2007**. NREL/TP-510-41168.
- Pistikopoulos, E.N.; Stefanis, S.K.; Livingston, A.G. A methodology for minimum environmental impact analysis. *AIChE Symposium Series*. **1994**, 90 (303), 139-150.
- Pokoo-Aikins G.; Heath A.; Mentzer R.A.; Mannan M.S.; Rogers W.J.; El-Halwagi M.M. A multi-criteria approach to screening alternatives for converting sewage sludge to biodiesel. *Loss Prevention in the Process Industries*, **2010**, 23 (3), 412-420.
- Pokoo-Aikins G.; Nadim A.; Mahalec V.; El-Halwagi M.M. Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **2010**, 12 (3), 239-254.
- Qin X.; Mohan T.; El-Halwagi M.M.; Cornforth F.; McCarl B.A. Switchgrass as an alternate feedstock for power generation: Integrated environmental, energy, and economic life cycle analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **2006**, 8 (4), 233-249.
- Secretaria de Energia (SENER), Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. Proyecto ME-T1007-ATN/DO-9375-ME, PN 04.2148.1-001.00. 2006.
- Saxena, R.C.; Adhikari, D.K.; Goyal, H.B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2009**, 13(1), 167-178.

- Saxena, R.C.; Seal, D.; Kumar, S.; Goyal, H.B. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2008**, 12 (3), 1909-1927.
- Raman, R.; Grossmann, I.E. Modelling and computational techniques for logic based integer programming, *Computers and Chemical Engineering*, **1994**, 18 (7), 563-578.
- Rotstein E.; Resasco D.; Stephanopoulos G. Studies on the synthesis of chemical reaction paths--I: Reaction characteristics in the (ΔG , T) space and a primitive synthesis procedure. *Chemical Engineering Science*. **1982**, 37 (9), 1337-1352.
- Vecchiotti, A.; Lee, S.; Grossmann, I.E. Modeling of discrete/continuous optimization problems: Characterization and reformulation of disjunctions and their relaxations, *Computers and Chemical Engineering*, **2003**, 27 (3), 443-448
- Werpy T.; Petersen G. *Top value added chemicals from biomass, Volume I: Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas*: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) and National Renewable Energy Laboratory (NREL); August **2004**.
- www.sugarcanebioethanol.org/es/download/resumo_executivo.pdf (2012)
- Zhu Y.; Jones S. *Techno-economic analysis for the thermochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol via acetic acid synthesis*. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory; **2009**. PNNL-18483.

APÉNDICE

A.1 NOMENCLATURA PARA LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CAPÍTULO 2.

NOMENCLATURA

ÍNDICES

i	Índice para la selección de la materia prima
j	Índice para la obtención del componente j
t_j	Índice para la selección de la tecnología de procesamiento t_j

PARÁMETROS

$\alpha_{i,t_j}(O_{t_j})$	Factor de conversión para la obtención del componente j
$Availab_j$	Materia prima disponible para el componente j
c_{t_j}	Costo por el uso de la tecnología t_j
$Demand_j$	Demanda del producto j
ei_j	Impacto ambiental por la obtención del componente j
H_Y	Tiempo de operación
M_{Cost_j}	Máximo costo de procesamiento para el componente j
M_{EI_j}	Límite máximo para las emisiones de GEI del componente j
$M_{f_i}^{\max}$	Límite máximo para el flujo del componente i
$M_{f_j}^{\min}$	Límite mínimo para el flujo del componente j
$Price_j$	Precio de venta de los productos obtenidos

VARIABLES

$Cost_j$	Costo de procesamiento del componente j
EI_j	Impacto ambiental por el procesamiento del componente j
f_j	Flujo del componente j
$Profit$	Ganancia total por año
$Sales$	Ventas totales por año de los productos obtenidos
$TotCost$	Costos totales anuales de procesamiento de la configuración óptima
$TotEI$	Emisiones totales para la configuración optima
Y_i	Variable Booleana para la producción del componente j a partir de i
Y_j	Variable Booleana para la existencia del componente j
y_j	Variable binaria para la existencia del componente j
Z_{j,t_j}	Variable Booleana para la existencia de la tecnología t_j
z_{j,t_j}	Variable binaria usada para la selección de la tecnología t_j para la producción del componente j

A.2 NOMENCLATURA PARA LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL CAPÍTULO 3 Y CAPÍTULO 4.

NOMENCLATURA

INDICES

i	Índice para las áreas de cultivo de agave
j	Índice para las plantas de procesamiento distribuidas
k	Índice para la industria tequilera
l	Índice para las plantas de procesamiento centrales
m	Índice para los mercados considerados
t	Índice para los periodos de tiempo
p	Índice para el conjunto de plantas distribuidas o centrales

CONJUNTOS

I	Conjunto para las áreas de cultivo de agave i
J	Conjunto para las plantas de procesamiento distribuidas j
K	Conjunto para la industria tequilera k
L	Conjunto para las plantas de procesamiento centrales l
M	Conjunto para los mercados m para la venta de bioetanol y combustible sólido
P	Conjunto para las plantas de procesamiento centrales y distribuidas
T	Conjunto para los periodos de tiempo t

PARÁMETROS

$\alpha_{Dehydrated}$	Eficiencia para el proceso de deshidratación
$\alpha_{Distillation}$	Eficiencia para el proceso de destilación

$\alpha_{Fermentation}$	Eficiencia para el proceso de fermentación
$\alpha_{Filtered1}$	Eficiencia para el proceso de filtrado de la primera etapa
$\alpha_{Filtered2}$	Eficiencia para el proceso de filtrado de la primera etapa para determinar el flujo que es enviado a la segunda etapa de hidrolisis.
$\alpha_{Filtered\ second1}$	Eficiencia para el proceso de filtrado de la segunda etapa para obtener el flujo de material fermentable
$\alpha_{Filtered\ second2}$	Eficiencia para el proceso de filtrado de la segunda etapa para obtener el combustible solido
$\alpha_{Reactor}$	Eficiencia para el proceso de reacción de la primera etapa de hidrolisis
$\alpha_{Reactor2}$	Eficiencia para el proceso de reacción de la segunda etapa de hidrolisis
α_{Sieve}	Eficiencia para el proceso de molienda
$\alpha_{SieveJuice}$	Eficiencia para el proceso de molienda para obtener el flujo de jugo rico en azucares fermentables
$\beta_m^{Bioethanol}$	Precio del bioetanol en el mercado m
$\beta_m^{SolidFuel}$	Precio del combustible sólido en el mercado m
$CFixPlant_p^{Column}$	Costo fijo para la columna de destilación
$CFixPlant_p^{Column2}$	Costo fijo para la columna de deshidratado
$CFixPlant_p^{Mill}$	Costo fijo para el molino
$CFixPlant_p^{Reactor}$	Costo fijo para el reactor
$CFixPlant_p^{Reactor2}$	Costo fijo para el reactor de la segunda etapa

$CFixPlant_p^{Sieve}$	Costo fijo para el separador
$CFixPlant_p^{Sieve2}$	Costo fijo para el separador de la segunda etapa
$CFixPlant_p^{Tank}$	Costo fijo para el tanque de fermentación
$CFixPlant_p^{Tank2}$	Costo fijo para fijo para el tanque de fermentación de la segunda etapa
$CFixPlant_p^{TankA}$	Costo fijo para el tanque de almacenamiento
$CVarPlant_p^{Column}$	Costo unitario variable para la columna de destilación
$CVarPlant_p^{Column2}$	Costo unitario variable para la columna de deshidratado
$CVarPlant_p^{Mill}$	Costo unitario variable para el molino
$CVarPlant_p^{Reactor}$	Costo unitario variable para el reactor
$CVarPlant_p^{Reactor2}$	Costo unitario variable para el reactor de la segunda etapa
$CVarPlant_p^{Sieve}$	Costo unitario variable para el separador
$CVarPlant_p^{Sieve2}$	Costo unitario variable para el separador de la segunda etapa
$CVarPlant_p^{Tank}$	Costo unitario variable para el tanque de fermentación
$CVarPlant_p^{TankA}$	Costo unitario variable para el tanque de almacenamiento
$CVarPlant_p^{Tank2}$	Costo unitario variable para el tanque de fermentación de la segunda etapa
$d_{i,p}^{Plant}$	Distancia del área de cultivo i a la planta p
$d_{k,p}^{Plant}$	Distancia de la industria tequilera k a la planta p

$d_{p,m}^{Plant}$	Distancia de la planta p al mercado m
$FAgave_{i,t}^{MAX}$	Flujo de agave máximo disponible en el área de cultivo i
$GBioethanol_{m,t}^{MAX}$	Demanda máxima de gasolina en el mercado m
$GBioethanol_{m,t}^{MIN}$	Demanda mínima de gasolina en el mercado m
$GSolidFuel_{m,t}^{MAX}$	Demanda máxima de combustible solido m
$GSolidFuel_{m,t}^{MIN}$	Demanda mínima de combustible solido m
K_F	Factor de anualización para los costos de capital
$UCostPlant_p^{OpColumn}$	Costo unitario de operación de la columna de destilación
$UCostPlant_p^{OpColumn2}$	Costo unitario de operación de la columna de deshidratado
$UCostPlant_p^{OpMill}$	Costo unitario de operación del molino
$UCostPlant_p^{OpReactor}$	Costo unitario de operación del reactor
$UCostPlant_p^{OpReactor2}$	Costo unitario de operación del reactor de la segunda etapa
$UCostPlant_p^{OpSieve}$	Costo unitario de operación del separador
$UCostPlant_p^{OpSieve2}$	Costo unitario de operación del separador de la segunda etapa
$UCostPlant_p^{OpTank}$	Costo unitario de operación del tanque de fermentación
$UCostPlant_p^{OpTank2}$	Costo unitario de operación del tanque de fermentación de la segunda etapa
$UCostPlant_p^{OpTankA}$	Costo unitario de operación del tanque de almacenamiento
$UCostTranspBag$	Costo unitario de transporte de la industria tequilera k a las plantas

$UCostTranspBio$	Costo unitario de transporte de las plantas de procesamiento a los mercados
$UCostTranspLeav$	Costo unitario de transporte de las áreas de cultivo i a las plantas
$UCostTranspSolid$	Costo unitario de transporte de las plantas de procesamiento a los mercados
zAH_i	Eficiencia para la obtención de piñas en las áreas de cultivo de agave i
zAL_i	Eficiencia para la obtención de bagazo en las áreas de cultivo de agave i
$zCooked_k$	Eficiencia para la obtención de bagazo en la industria tequilera k

VARIABLES

$CPlant_p^{Column}$	Costos de capital para la columna destilación
$CPlant_p^{Column2}$	Costos de capital para la segunda columna de destilación
$CPlant_p^{Mill}$	Costos de capital para el molino
$CPlant_p^{Reactor}$	Costos de capital para el reactor
$CPlant_p^{Reactor2}$	Costos de capital para el reactor de la segunda etapa
$CPlant_p^{Sieve}$	Costos de capital para el separador
$CPlant_p^{Sieve2}$	Costos de capital para el separador de la segunda etapa
$CPlant_p^{Tank}$	Costos de capital para el tanque de fermentación
$CPlant_p^{TankA}$	Costos de capital para el tanque de almacenamiento

$CPlant_p^{Tank2}$	Costos de capital para el tanque de fermentación de la segunda etapa
$CoperPlant_p^{Column}$	Costos de operación para la columna de destilación
$CoperPlant_p^{Column2}$	Costos de operación para la segunda columna de destilación
$CoperPlant_p^{Mill}$	Costos de operación del molino
$CoperPlant_p^{Reactor}$	Costos de operación del reactor
$CoperPlant_p^{Reactor2}$	Costos de operación del reactor de la segunda etapa
$CoperPlant_p^{Seive}$	Costos de operación del separador
$CoperPlant_p^{Seive2}$	Costos de operación del separador de la segunda etapa
$CoperPlant_p^{Tank}$	Costos de operación del tanque de fermentación
$CoperPlant_p^{TankA}$	Costos de operación del tanque de almacenamiento
$CoperPlant_p^{Tank2}$	Costos de operación del tanque de fermentación de la segunda etapa
$CostPlant^{CAP}$	Costos totales de capital para las plantas de procesamiento
$CostPlant^{OP}$	Costos totales de operación para las plantas de procesamiento
$CostTranspBagasse_{Teq}^{Central}$	Costos de transporte del bagazo de agave de la industria tequilera a las plantas centrales de procesamiento
$CostTranspBagasse_{Teq}^{Dist}$	Costos de transporte del bagazo de agave de la industria tequilera a las plantas distribuidas de procesamiento
$CostTranspLeaves^{Central}$	Costos de transporte del bagazo de las áreas de cultivo a las plantas centrales de procesamiento

$CostTranspLeaves^{Dist}$	Costos de transporte del bagazo de las áreas de cultivo a las plantas distribuidas de procesamiento
$CostTranspProdBioethanol$	Costos de transporte del bioetanol a los mercados
$CostTranspProdSolidFuel$	Costos de transporte del combustible sólido a los mercados
$GBioethanol_{m,t}$	Flujo total de bioetanol que es enviado a los mercados m
$gprodBioethanol$	Flujo de bioetanol que es enviado de las plantas de procesamiento a los mercados
$gprodSolidFuel$	Flujo de combustible sólido que es enviado de las plantas de procesamiento a los mercados
$GSolidFuel_{m,t}$	Flujo total de combustible sólido que es enviado a los mercados m
$FBagasseTequila$	Flujo de bagazo que es enviado de la industria tequilera k a las plantas de procesamiento
$FColumn1_{p,t}^{Plant}$	Flujo a la entrada de la columna de destilación
$FColumn2_{p,t}^{Plant}$	Flujo a la entrada de la columna de deshidratado
$FFermentation_{p,t}^{Plant}$	Flujo a la entrada del proceso de fermentación
$FFiltered\ second_{p,t}^{Plant}$	Flujo a la entrada del proceso de filtrado de la segunda etapa
$Ffiltered1_{p,t}^{Plant}$	Flujo a la entrada del proceso de filtrado de la primera etapa
$Ffiltered2_{p,t}^{Plant}$	Flujo a la salida de la primera etapa de filtrado y que es enviado a la segunda etapa de hidrolisis
$FFuelSolid_{p,t}^{Plant}$	Flujo obtenido de combustible solido

$FPlantHeads_{i,t}$	Flujo de piñas de agave disponibles en el área de cultivo de agave i
$FPlantHeads_{i,k,t}^{TequilaIndustry}$	Flujo de piñas de agave que es enviado de las áreas de cultivo i a la industria tequilera k
$FMill_{p,t}^{Plant}$	Flujo en la etapa de molienda
$FprodBioethanol_{p,t}^{Plant}$	Flujo de bioetanol producido en las plantas de procesamiento
$FReactor_{p,t}^{Plant}$	Flujo en el proceso de reacción en la primera etapa
$FReactor2_{p,t}^{Plant}$	Flujo en el proceso de reacción en la segunda etapa
$FStock_{p,t}^{Plant}$	Flujo de bioetanol obtenido en plantas distribuidas y/o centrales
$FTank_{p,t}^{Plant}$	Flujo en los tanques de almacenamiento en plantas de procesamiento
$FTequilaBagasse_{k,t}$	Flujo total de bagazo de la industria tequilera k
$FTotalBagasse_{p,t}^{Plant}$	Flujo total de bagazo en las plantas de procesamiento
$FTotalHeads_{k,t}^{TequilaIndustry}$	Flujo total de piñas de agave en la industria tequilera k
$FTotalLeavesBagasse_{i,t}$	Flujo de bagazo de agave en las áreas de cultivo i
$FTotalLeavesBagasse$	Flujo de bagazo en las áreas de cultivo i que es enviado a las plantas de procesamiento
$PROFIT$	Ganancias totales anuales
$TotCost$	Costos totales anuales
$TotSales$	Ventas totales anuales
y_p	Variable binaria para la existencia de plantas de procesamiento distribuidas y/o centrales

A.3 PRODUCTOS OBTENIDOS.



Article

pubs.acs.org/IECR

Optimization of Pathways for Biorefineries Involving the Selection of Feedstocks, Products, and Processing Steps

Pascual Eduardo Murillo-Alvarado,[‡] José María Ponce-Ortega,^{*,‡} Medardo Serna-González,[‡] Agustín Jaime Castro-Montoya,[‡] and Mahmoud M. El-Halwagi^{‡,§}

[‡]Department of Chemical Engineering, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58060

[‡]Department of Chemical Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas 77843-3122, United States

[§]Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

Supporting Information

ABSTRACT: This paper presents a systematic approach to identify the optimal pathway configurations of a biorefinery while incorporating technical, economic, and environmental objectives. This problem is formulated as a generalized disjunctive programming model which accounts for the simultaneous selection of products, feedstocks, and processing steps. The optimal solution can involve multiproduct and multifeedstock biorefineries. The optimization model takes into account two potentially conflicting objectives, the maximization of the net profit and the minimization of the greenhouse gas emissions, while considering the number of processing steps. The environmental criterion is measured using the life cycle assessment methodology. The ϵ -constraint method is used to determine the Pareto curves of this multiobjective optimization problem and to show the trade-offs between the competing objectives. A case study is presented to illustrate the applicability of the proposed methodology for the optimal selection of the biorefinery configuration for the conditions of Mexico under several scenarios. The results show that the optimal combination of different feedstocks and products allows for proper trade-off between the economic and environmental objectives. Results also show that bioethanol, biodiesel, and biohydrogen usually appear as products, whereas sugar cane, jatropha, and microalgae appear as feedstocks in the optimal pathways.

INTRODUCTION

Recently, there has been a growing interest in developing renewable energy technologies to address the escalating problems associated with greenhouse gas (GHG) emissions related to the use of fossil fuels and to extend the useful life of fossil fuel reserves. In this context, biofuels (i.e., fuels obtained from biomass) offer the potential to achieve these objectives. Nonetheless, several factors must be considered for the sustainable production of biofuels. For example, there is a critical need for optimizing the selection of the feedstocks, the preprocessing stages, the processing technologies, and the manufactured products. Within the biorefinery, where biomass is processed through physical, chemical, and/or biological technologies to obtain biofuels and other value-added chemicals, there are numerous possibilities, as can be seen in Figure 1. Different types of feedstocks, processing pathways, and products are possible and must be carefully screened.

Issues pertaining to the selection of feedstocks have been discussed in the literature (e.g., Huber et al.,¹ Saxena et al.,^{2,3} Goyal et al.,⁴ and Daoutidis et al.⁵). Kamm and Kamm,⁶ Fernando et al.,⁷ and Fatehi and Ni⁸ showed that different products can be obtained from different lignocellulosic feedstocks. Werpy and Petersen⁹ and Holladay et al.¹⁰ reported a list of the top-value bioproducts. You et al.¹¹ presented a synthesis method to obtain ethanol from cellulosic biomass involving the life cycle assessment technique. Previous works show that the chemical route to produce a desired bioproduct can be quite complicated. To solve this problem, several pathway synthesis methods have been reported in the literature.

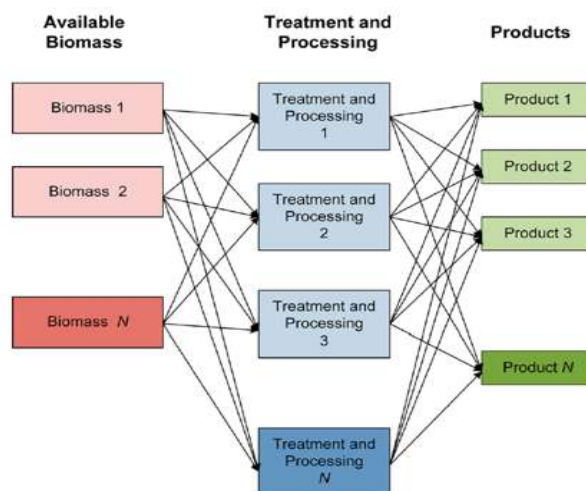


Figure 1. Schematic representation for biorefinery configurations.

Agnihotri and Motard¹² and Nishida et al.¹³ presented approaches for the reaction pathway synthesis. Govind and

Received: December 12, 2012

Revised: March 2, 2013

Accepted: March 13, 2013

Published: March 13, 2013

Optimization of the Supply Chain Associated to the Production of Bioethanol from Residues of Agave from the Tequila Process in Mexico

Pascual Eduardo Murillo-Alvarado,[†] José Ezequiel Santibañez-Aguilar,[†] José María Ponce-Ortega,^{*,‡} Agustín Jaime Castro-Montoya,[†] Medardo Serna-González,[†] and Mahmoud M. El-Halwagi^{‡,§}

[†]Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58060

[‡]Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas, United States 77843-3122

[§]Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

Supporting Information

ABSTRACT: The Mexican economy is highly dependent on the tequila industry, where there are associated several residues of agave (i.e., the plant used to make tequila), which is lignocellulosic matter that can be used as feedstock for bioethanol production. The residues of agave are obtained in the harvesting sites located in several states of Mexico and from the tequila factories that are mainly located in two places in Mexico. This paper presents an optimization framework for designing a supply chain for the bioethanol production from residues of agave bagasse obtained in the tequila processing in Mexico, where central and distributed bioethanol processing plants are considered. The bioethanol production process in the central and distributed plants is modeled according to conversion factors for the different processing steps obtained from experimental data. The proposed optimization formulation also considers the total available agave and the bioethanol demand in Mexico. Several scenarios are analyzed for the bioethanol production from agave bagasse in Mexico, where positive results are obtained from the reuse of residues of agave bagasse for bioethanol production, obtaining considerable profits and satisfying a significant demand of the gasoline required in the area.

1. INTRODUCTION

The agave is a perennial arid plant that consists of thin sheets around a pineapple (or plant head), whose main elements are fibers, sugars, minerals, and water. Juice with high concentration of fructose and other vitamin properties is naturally produced in the center of the pineapple; also, agave has some fat particles that yield its distinctive taste and smell. This way, a large number of products can be obtained from agave as honey water, paper, textiles, *mezcal* (i.e., a fermented beverage similar to tequila), and tequila. Mexico is one of the areas with the greatest diversity of species of agave in the world. For this reason, agave is one of the most important industries associated to tequila and *mezcal* production, where the agave plant is used as source of fermentable sugars. The agave is mainly cultivated in the central-western part of Mexico (in the states of Jalisco, Guanajuato, and Michoacán), and most of the factories associated to the tequila industry are located in this region. During the processing of agave to yield tequila, several lignocellulosic residues from the agave are produced. These residues correspond to the stalks that are obtained in the cultivation areas because these are not used for the tequila process, and also, there are other lignocellulosic residues obtained in the factories associated to the tequila processing from the plant heads after the fermentation process. Nowadays, the residues from the agave generated in this region represent a considerable pollution problem because these residues are not used at all. However, these lignocellulosic residues can be used as raw material to produce several value-added products, including bioethanol and solid fuel. Furthermore, satisfying the

fuel requirements is a serious problem due to the reduction of oil reserves around the world and the associated greenhouse gas emissions. In this regard, biofuels are expected to decrease the negative environmental impact for energy use. These biofuels are produced from biomass and organic wastes with high carbon content; for example, bioethanol is one of the most accepted biofuels that can be used as substitution of gasoline. Furthermore, there are several routes to produce bioethanol, most of them through fermentation. Huang et al.¹ studied the effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol. Dutta et al.² presented an economic comparison of different fermentation configurations to obtain ethanol using various microorganisms to observe the advantages with respect to the configuration of the production process. Also, a techno-economic analysis comparing several routes for bioethanol production from corn stover and lignocellulosic materials was reported by Kazi et al.³ In addition, several chemical and biochemical routes have been proposed for the bioethanol production from lignocellulosic materials such as wheat straw, wood chips, different bagasse, and others. Kaparaju et al.⁴ proposed the utilization of wheat straw to obtain different biofuels as ethanol, hydrogen, and biogas via hydrothermal pretreatment. Cardona et al.⁵ discussed the profitability of bioethanol production from lignocellulosic materials consider-

Received: September 24, 2013

Revised: February 17, 2014

Accepted: March 5, 2014

Published: March 5, 2014