



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE
PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES CONSIDERANDO
ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

P.I.Q. JOSÉ EZEQUIEL SANTIBAÑEZ AGUILAR

ASESOR

DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

Morelia, Michoacán a Febrero de 2011





FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO

No. Oficio 254/2010/2011.

L.F.M. ROBERTO PÉREZ CHÁVEZ
JEFE DE LA SECCIÓN DE CERTIFICACIÓN
Y TITULACIÓN DE LA U.M.S.N.H.
PRESENTE.

Por medio del presente, me estoy permitiendo transcribir a esa Sección de Certificación a su digno cargo la comunicación enviada a esta Dirección por la mesa de jurado de examen Recepcional de esta fecha y que a la letra dice:

Atendiendo a las indicaciones se hizo la revisión de manuscrito de Tesis presentado por el pasante de Ingeniería Química: **P.I.Q. JOSÉ EZEQUIEL SANTIBÁÑEZ AGUILAR**

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente el interesado: **ENTERADOS:**

Comunico a usted lo anterior para los fines legales a que haya lugar.

DR. PONCE ORTEGA JOSÉ MARÍA	PRESIDENTE	03002829
M.C. MARTINEZ HERNANDEZ MARÍA GUADALUPE	VOCAL	87002477
DR. VÁSQUEZ GARCÍA SALOMÓN RAMIRO	VOCAL	02001420
ING. MARTINEZ RODRIGUEZ ALFONSO	SUPLENTE	72014504

ATENTAMENTE

Morelia, Mich. A 27 de Enero de 2011.


M.C. RODOLFO RUIZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD
DE INGENIERÍA QUÍMICA

U.M.S.N.H.



FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO

Morelia, Mich. 27 de Enero de 2011.

M.C. RODOLFO RUIZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.

Atendiendo a sus indicaciones se hizo la revisión del manuscrito de Tesis presentada por el P.I.Q.
JOSÉ EZEQUIEL SANTIBÁNEZ AGUILAR

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente al interesado.

DR. JOSÉ MARÍA PONCE

M.C. MARTINEZ HERNANDEZ MARIA GUADALUPE

DR. VÁSQUEZ GARCÍA SALOMON RAMIRO

U.M.S.N.H.



FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA

DEDICATORIA

A **Dios**, por haberme permitido concluir este trabajo con éxito y salud, pues nunca me dejo solo, aunque pasé momentos difíciles el siempre me ayudo a encontrar el camino para salir victorioso ante las adversidades.

A mis padres, el señor **Reynaldo Santibañez Velázquez** y la señora **Gloria Aguilar Dueñas**, por apoyarme siempre en múltiples maneras, no sólo en el aspecto económico sino también en el sentimental, siempre estuvieron ahí para tener un hombro en el cuál recargarme y una mano con la cual contar.

A **mis hermanos** que me animaron a seguir adelante, compañeros de juegos y peleas, con los cuales aprendí a que uno tiene que luchar por lo que quiere.

A mis **amigos y amigas** por darme consejos cuando los necesite y ayudarme cuando las circunstancias así lo ameritaban, porque gracias a muchos de ellos salí avante en este camino difícil y me enseñaron que es solo una etapa.

A mi novia **Aurora** por ayudarme y comprenderme en el tiempo que no pude pasar con ella, por los sacrificios que realizó para que este trabajo tuviera buen fin.

A mi asesor **José María** por su tiempo, disposición y paciencia que tuvo conmigo en la realización de este trabajo.

Al **grupo de trabajo** por sus observaciones en pro de la tesis, con las cuales fui mejorando cada vez este manuscrito.

ATENTAMENTE

José Ezequiel Santibañez Aguilar



ÍNDICE

Contenido	Página
GLOSARIO	i
RELACIÓN DE TABLAS	ii
RELACIÓN DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
◇ Justificación	3
◇ Antecedentes.....	6
◇ Objetivo General.....	9
◇ Objetivos particulares.....	9
◇ Hipótesis	10
II. MARCO TEÓRICO.....	11
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	22
◇ Metodología	22
• Formulación del modelo.....	23
- <i>Balances de masa</i>	23
- <i>Disponibilidad máxima de materias primas</i>	25
- <i>Demanda máxima de productos</i>	26
- <i>Límites máximos de procesamiento</i>	26
- <i>Función objetivo</i>	27
- <i>Objetivo económico</i>	28



- <i>Objetivo ambiental</i>	28
• Solución del modelo para un caso de estudio.....	29
IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
◇ Análisis de sensibilidad	45
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS	50
APÉNDICE A.- CÓDIGO GAMS DEL PROBLEMA	55
APÉNDICE B.- EJEMPLO DE USO DEL ECO-INDICADOR	64
APÉNDICE C. EJEMPLO DEL MÉTODO SIMPLEX	69



GLOSARIO

BIOCOMBUSTIBLE: Es un combustible producido a partir de biomasa, donde su principal diferencia con un combustible convencional es que presenta una menor emisión neta de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida.

BIOMASA: Es un recurso renovable, que tiene un gran potencial para la producción de energía y productos químicos, proveniente normalmente del sector agroindustrial.

BIOREFINERÍA: Es una industria química dedicada a producir combustibles y/o productos químicos a partir de biomasa como materia prima.

ECO-INDICADOR: Es una medida del impacto ambiental generado por una sustancia, proceso o actividad. Basada en el daño que esta puede generar al ambiente.

IMPACTO AMBIENTAL GLOBAL: Es el impacto total generado por una sustancia, proceso o actividad realizando un seguimiento desde el nacimiento hasta la muerte de estas.

OPTIMIZACIÓN: Se refiere a la mejor manera de realizar una actividad o conjunto de ellas, involucrando el proceso de búsqueda de la mejor solución a un problema que este sujeto a uno o varios objetivos.

PROCESO SUSTENTABLE: Es un proceso, en el cual las actividades involucradas permiten que éste se lleve a cabo a través del tiempo y no sobrepasando la autodepuración de su entorno.



RELACIÓN DE TABLAS

- Tabla 1.** Factores de conversión para diferentes tecnologías de procesamiento expresados como relación de la cantidad de producto respecto a materia prima.
- Tabla 2.** Factores de conversión para diferentes tecnologías de procesamiento expresados como relación de la cantidad de subproducto respecto a materia prima.
- Tabla 3.** Costo de procesamiento para diferentes materias primas, rutas de procesamiento y productos.
- Tabla 4.** Disponibilidad y costo por uso de material prima para producción de biocombustibles en México.
- Tabla 5.** Costo y demanda de productos para el escenario propuesto.
- Tabla 6.** Costo de subproducto producido a través de diferentes alimentaciones.
- Tabla 7.** Eco-Indicador 99 para cada alimentación.
- Tabla 8.** Eco-Indicador 99 por cantidad de producto producido y usado como biocombustible de acuerdo al escenario propuesto.
- Tabla 9.** Eco-Indicador 99 por cantidad de alimentación procesada para la producción de biocombustibles.
- Tabla 10.** Solución de caso B (Ganancia igual a 1394 Millones de dólares e Impacto ambiental igual a 51×10^7 PTS).



Tabla 11. Solución de caso C (Ganancia igual a 1853 Millones de dólares e Impacto ambiental igual a 225×10^7 PTS).

Tabla 12. Solución de caso D (Ganancia igual a 1600 Millones de dólares e Impacto ambiental igual a 145×10^7 PTS para una disponibilidad de caña de azúcar de 40% de la máxima disponible).

Tabla 13. Indicadores para la producción (Materiales, tratamientos y energía extra) en el ejemplo del apéndice B.

Tabla 14. Indicadores para el uso (Transporte, energía y posibles materiales auxiliares) en el ejemplo del apéndice B.

Tabla 15. Indicadores para la disposición (Proceso de disposición para cada tipo de material) en el ejemplo del apéndice B.



RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1.** Ejemplo de opciones a enfrentar para tomar la mejor decisión en la planificación de un sistema de producción de biocombustibles.
- Figura 2.** Ejemplo de problema de optimización.
- Figura 3.** Antecedentes y propuesta, para la planificación óptima de un sistema de producción de biocombustibles.
- Figura 4.** Descripción en dos dimensiones de cómo se forma la región factible en un problema de programación lineal (LP).
- Figura 5.** Métodos para resolver problemas del tipo multiobjetivo.
- Figura 6.** Ejemplo de curva *Pareto*, donde se muestran ejemplos de puntos sub-óptimos e infactibles.
- Figura 7.** Diagrama del ciclo de vida para la producción de un biocombustible.
- Figura 8.** Descripción del método del Eco-Indicador 99.
- Figura 9.** Representación de pasos para el cálculo del Eco-Indicador 99.
- Figura 10.** Superestructura propuesta para la planificación óptima de un sistema de producción de biocombustibles.
- Figura 11.** Diferencia en el modelado de un modelo convencional y uno de caja negra para la conversión de materia prima.
- Figura 12.** Ejemplo sobre la disponibilidad máxima de materias primas.



Figura 13. Ejemplo de restricción sobre la demanda máxima de productos.

Figura 14. Representación del objetivo global, en base a las dos funciones objetivo principales.

Figura 15. Contexto en el que se desarrolla el caso de estudio.

Figura 16. Solución *Pareto* para el caso de estudio.

Figura 17. Diagrama de flujo para (a) Solución B y (b) Solución C de la curva *Pareto*.

Figura 18. Análisis de sensibilidad para diferentes valores de disponibilidad de caña de azúcar.

Figura 19. Diagrama de proceso de un modelo simplificado de máquina de café, con cantidades y suposiciones.



PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de **optimización** multiobjetivo para la planificación de un sistema de conversión de **biomasa**, específicamente para un sistema de producción de biocombustibles. El problema multiobjetivo considera simultáneamente la maximización de la ganancia neta y la minimización del **impacto ambiental global**. La función objetivo económica considera la disponibilidad de materia prima, demanda de productos y subproductos, límites de procesamiento para una región específica, así como los costos de materias primas, productos, subproductos y procesamiento, además de los involucrados con el transporte y almacenamiento; mientras que la evaluación de la función objetivo ambiental se realiza a través de la *metodología del análisis del ciclo de vida* que considera la evaluación del **impacto ambiental global** por medio del **Eco-Indicador 99**. Se propone una estrategia de optimización multiobjetivo para identificar la curva *Pareto* que describe el conjunto de soluciones óptimas desde los puntos de vista económico y ambiental, ya que estos dos objetivos se contraponen entre sí. La metodología propuesta se aplicó a un caso de estudio para la planificación óptima de un sistema de producción de biocombustibles en México. No se observaron complicaciones numéricas en la solución del modelo propuesto.



OPTIMAL PLANNING OF A BIOFUELS PRODUCTION SYSTEM CONSIDERING ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

ABSTRACT

This paper presents a multiobjective optimization model based on a mathematical programming formulation for the optimal planning of a biorefinery, considering the optimal selection of feedstock, processing technology and a set of products. The multiobjective optimization problem simultaneously considers the profit maximization and the environmental impact minimization. The economic objective function takes into account the availability of bioresources, processing limits and demand of products, as well as the costs of feedstocks, products and routes of processing; while the environmental assessment includes the overall environmental impact measured through the Eco-Indicator 99 based on the life cycle analysis methodology. However the economic and environmental objectives contradict each other, by means of the proposed methodology it is possible to obtain the *Pareto* curve that identifies the set of optimal solutions for both objectives. The proposed methodology is applied to a case of study for planning the production of a biorefinery in Mexico. No complications were observed in the numerical solution of the model.



INTRODUCCIÓN

Justificación

Las preocupaciones ambientales en relación a la producción de energía a partir de combustibles fósiles, además de la concientización de las consecuencias de descargar los efluentes sobre los recursos naturales han hecho que las restricciones ambientales sean cada vez más estrictas, situaciones que unidas a la alza en los precios y la incertidumbre en la disponibilidad del petróleo en los próximos años, han llevado a la investigación de alternativas para la producción de combustibles, resultando la **biomasa** como una buena alternativa para llevar a cabo la producción de combustibles y químicos.

Hoy en día se tiene un panorama positivo para la producción de **biocombustibles**, ya que además de reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles, pueden asegurar tanto la independencia como la seguridad energética, además de considerar los incentivos por la reducción de emisiones de CO₂ hacia la atmosfera que éstos generan.

Una de las opciones más estudiadas y aceptadas para la producción de **biocombustibles** es el uso de **biomasa**, puesto que una de sus ventajas es que puede impactar de menor manera al ambiente respecto de los combustibles fósiles.

De acuerdo con Clark y colaboradores¹ se dice que la mejor manera de garantizar la sustentabilidad de la producción de productos químicos y materiales industriales es el uso de la química verde y materiales renovables a bajo costo como la **biomasa** disponible, especialmente la que proviene del sector agroindustrial, pues reduce el uso de combustibles fósiles no renovables, produciendo químicos limpios y seguros, cumpliendo con los requerimientos legales y de los clientes simultáneamente. Weit y colaboradores² mostraron que la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos es una alternativa más viable comparada con el consumo de combustibles fósiles, unida a la ventaja que los materiales lignocelulósicos no implican materia prima de grado alimenticio; para analizar la eficiencia de la conversión de masa y energía, ellos realizaron un estudio



comparativo entre diferentes rutas de procesamiento usando modelos del tipo de caja negra.

En la actualidad, es de suma importancia tomar en cuenta diferentes alternativas de **biomasa** para evitar el desabasto de alimentos o no afectar las regiones que tienen como propósito la agricultura. Por otro lado, ya que existe una vasta variedad de **biomasa**, tales como desechos animales y vegetales, de los cuales se puede obtener una gran variedad de productos. Simultáneamente existen varias tecnologías para la conversión de **biomasa** que compiten entre sí, y han sido objeto de estudio, algunas de ellas están siendo utilizadas actualmente. Cada una de estas tecnologías tiene su propio costo y eficiencia, además de sus límites de procesamiento, consecuentemente éstas son susceptibles a ser evaluadas en cuanto a su viabilidad técnico-económica, y el impacto ambiental que éstas producen.

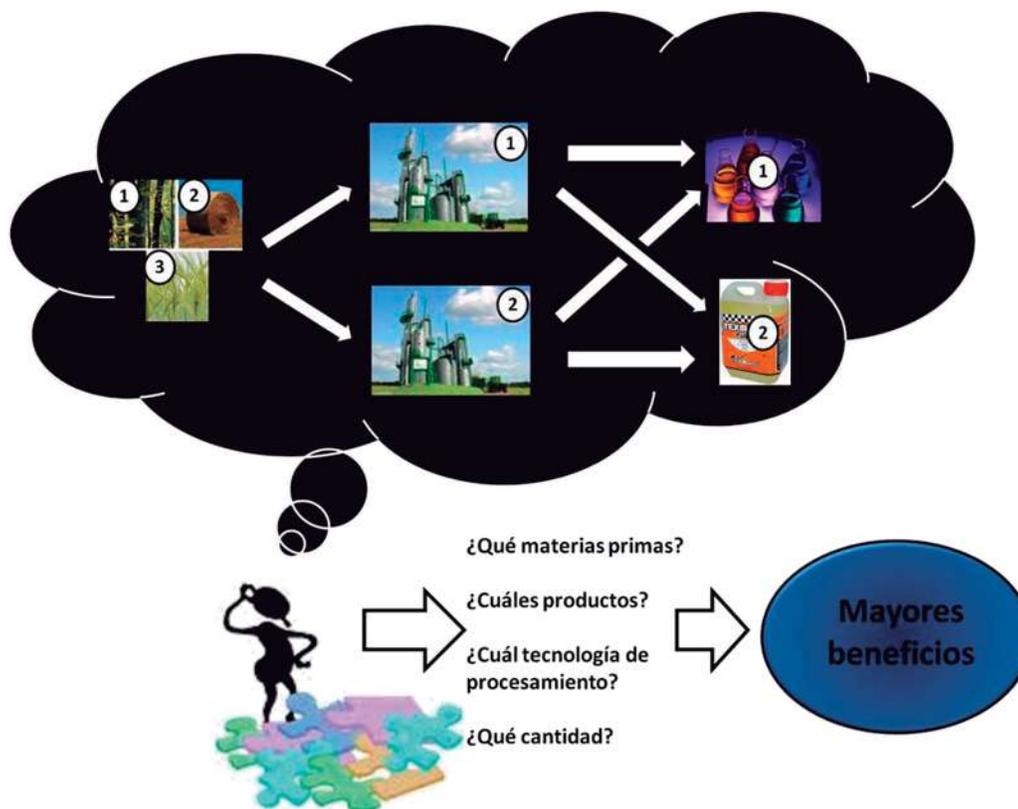


Figura 1. Ejemplo de opciones a enfrentar para tomar la mejor decisión en la planificación de un sistema de producción de biocombustibles.



Para desarrollar soluciones, los ingenieros generalmente están confrontados con un vasto número de opciones a evaluar, para tomar una decisión y así obtener el mayor beneficio (**Figura 1**) como: el tipo de tecnologías, cantidad de materias primas y productos; lo que ocasiona que haya muchas alternativas para enumerar. Estos retos exigen el desarrollo de una propuesta aplicable, general y sistemática, la cual permita observar las circunstancias específicas del proceso y los puntos de vista del problema desde una perspectiva económica y ambiental que además sea holística e integral.

La selección de la “mejor” solución de todo un conjunto de soluciones posibles, implica el uso de técnicas de **optimización**, donde se pueden plantear una o varias funciones objetivo que se maximizan o minimizan según sea el caso (p.e., ganancia, impacto ambiental, etc.) las cuales están sujetas a ciertas restricciones dadas como igualdades o desigualdades (**Figura 2**).

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } z = f(\vec{x}) + B\vec{y} \\ & \text{Sujeto a:} \\ & h(\vec{x}) + A\vec{y} = 0 \\ & g(\vec{x}) + C\vec{y} \leq 0 \\ & D\vec{y} \leq d \\ & \vec{x} \in R \\ & \vec{y} \in 0,1 \end{aligned}$$

Figura 2. Ejemplo de problema de optimización



Antecedentes

El concepto de **biorefinería** integrada fue tomado en cuenta después del año 2008; por tanto, los reportes previos del tratamiento de **biomasa** incluyen estudios independientes en materias primas, rutas de procesamiento y eficiencia de productos. Aksoy y colaboradores³ aplicaron el concepto de **biorefinería**, sin embargo, el impacto ambiental no fue considerado en la evaluación técnico-económica de los procesos. Por otra parte, Cherubini y colaboradores⁴ consideraron aspectos ambientales durante la evaluación de diferentes tecnologías de procesamiento; ellos evaluaron la eficiencia energética pero sin considerar el beneficio económico. A pesar de que Mansoornejad y colaboradores⁵ incluyeron aspectos ambientales a través del análisis del ciclo de vida; no consideraron un conjunto de alimentaciones, rutas de procesamiento y productos. Chambost y colaboradores⁶ presentaron la definición para el diseño de la industria de transformación y producción para la implementación de una **biorefinería** forestal. Sammons y colaboradores⁷ presentaron un enfoque para ayudar a las industrias que procesan biomasa en la evaluación de la rentabilidad de una gama de diferentes rutas de procesamiento y productos para una cadena de suministro, maximizando el beneficio económico, y Elms y El-Halwagi⁸ desarrollaron un procedimiento sistemático para la calendarización y operación de plantas de biodiesel que pueden adaptarse para una variedad de alimentaciones.

El trabajo de Kokossis y Yang⁹ mostró el papel del sistema de tecnologías de proceso para promover su uso en la producción de **biocombustibles**. Goyal y colaboradores¹⁰ reportaron una revisión bibliográfica para la producción de **biocombustibles** a partir de conversión termoquímica y recursos renovables enfocados en varios parámetros operacionales. Un enfoque eficiente para la utilización de la **biomasa** combinada con calor y sistemas de potencia a través de integración de procesos fue reportado por Mohan y El-Halwagi¹¹, y Myint y El-Halwagi¹², presentaron un enfoque para el diseño y optimización de procesos de producción de biodiesel a partir de aceite de soya. Además, Pokoo-Aikins y colaboradores¹³ realizaron el diseño y el análisis técnico-económico de un sistema



integrado de producción de biodiesel con aceite de alga vía el secuestro de bióxido de carbono proveniente de los gases de combustión de la planta. Un enfoque de varios criterios para seleccionar de entre varias alternativas para la conversión de los lodos de desecho en biodiesel fue presentado por Pokoo-Aikins y colaboradores¹⁴. Sammons y colaboradores¹⁵ presentaron una superestructura flexible para encontrar la producción óptima de una **biorefinería**. Modelos de programación mixta entera lineal para redes de cadenas de suministro fueron reportados por Van Dyken y colaboradores¹⁶ y un sistema de soporte de decisión para la explotación de **biomasa** forestal para la producción de energía fue presentado por Freppaz y colaboradores¹⁷.

Adicionalmente, diferentes tecnologías de procesamiento y materias primas para la producción de un gran número de **biocombustibles** han sido reportadas. Chew and Bhatia¹⁸ obtuvieron valores de conversión para la producción de hidrógeno y biodiesel a través de aceite de palma, de un conjunto de alternativas enfocadas en el uso de diferentes catalizadores. Huang y colaboradores¹⁹ realizaron un estudio comparativo de los costos de manufactura de etanol a partir de materiales lignocelulósicos y evaluaron la dependencia entre la producción de etanol y la cantidad de electricidad utilizada en el procesamiento. Mientras que Kaparaju y colaboradores²⁰ propusieron la producción de etanol, hidrógeno y biogas a partir de paja de trigo, en una superestructura que implementa el concepto de **biorefinería**.

Por otra parte, respecto del impacto ambiental, Azapagic y Clift²¹ introdujeron la metodología de la evaluación del ciclo de vida en problemas de **optimización**; ellos mostraron las ventajas de la evaluación del ciclo de vida en problemas de funciones multiobjetivo donde los aspectos económicos y ambientales son de primordial importancia. Hugo y Pistikopoulos²² presentaron una metodología multiobjetivo basada en programación matemática para la inclusión del criterio del análisis del ciclo de vida como parte de la estrategia para la toma de decisiones relativo a la planificación y diseño de las redes de cadenas de suministro. También, Guillén-Gosálbez y colaboradores²³ propusieron una nueva estructura para el diseño **óptimo** de procesos químicos incorporando restricciones ambientales a través de la evaluación del ciclo de vida enfocada en problemas mixto entero, y Guillén-Gosálbez y Grossmann^{24,25} presentaron modelos para el diseño ambiental en las redes de

cadena de suministro en condiciones de incertidumbre. Tan y colaboradores²⁶ reportaron un enfoque multiobjetivo para la optimización de sistemas de bioenergía, y Urban y colaboradores²⁷ presentaron una estructura técnico-ecológica para el ciclo de vida de la producción de etanol de maíz en una zona residencial típica. Ojeda y colaboradores²⁸ reportaron el uso del bagazo de caña para producción de **biocombustibles** de segunda generación; ellos usaron herramientas computacionales para la evaluación de la energía y el ciclo de vida para encontrar la mejor configuración de los procesos y sus posibles mejoras. Adicionalmente, ellos aplicaron principios de integración de procesos para diseñar estrategias para la conservación de recursos naturales y la reducción del impacto ambiental.

En la mayoría de estos trabajos se observa, que no consideran simultáneamente los aspectos económicos y ambientales. Además algunas de las metodologías reportadas tienen muy limitada la evaluación del impacto ambiental.



Figura 3. Antecedentes y propuesta para la planificación óptima de un sistema de producción de biocombustibles.



Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático que determine la elección de tipos y cantidad de materias primas y productos, así como de sus rutas de procesamiento adecuadas en un sistema de producción de **biocombustibles**, por medio de programación matemática y técnicas de optimización, para obtener los mayores beneficios desde el punto de vista económico-ambiental.

Objetivos particulares

1. Escritura de una tesis de licenciatura basada en un trabajo de investigación en el área de ingeniería química para obtener el grado de ingeniero químico
2. Evaluación del impacto ambiental, en un sistema de producción de **biocombustibles**; con ayuda de la metodología del análisis del ciclo de vida por medio del método del **Eco-Indicador 99**, para considerar una medida más objetiva del impacto ambiental.
3. Generación de un modelo general para tomar en cuenta la ganancia neta anual como aspecto económico y la medida del impacto ambiental global como aspecto ambiental, en un sistema de producción de **biocombustibles**, con ayuda de programación matemática y técnicas de optimización para poder aplicarlo y resolver un caso de estudio, sobre un sistema de producción de **biocombustibles** en México.
4. Mostrar el compromiso entre los objetivos económico y ambiental por medio de un método para resolver problemas de programación multiobjetivo y exponer la competencia para el uso de la **biomasa** de grado alimenticio en contra de su uso para producción de **biocombustibles** y ayudar a tomar decisiones para un mejor aprovechamiento de la **biomasa**.



Hipótesis

Con el desarrollo de un modelo general para la planificación óptima de un sistema de **biocombustibles** que considere simultáneamente los aspectos económicos y ambientales, y su aplicación a un caso de estudio se pretende comprobar que el modelo puede contribuir a tomar mejores decisiones para el uso de **biomasa** como fuente de energía disminuyendo de la mejor manera la dependencia que se tiene de los combustibles fósiles impactando en el sector energético y agro-industrial.

Los aspectos económicos serán considerados por medio de la ganancia neta anual y los aspectos ambientales en base a la metodología del análisis del ciclo de vida por medio del método del **Eco-Indicador 99**.



MARCO TEÓRICO

Existen varias maneras de resolver un problema de **optimización**, dependiendo de la naturaleza matemática de la función objetivo, las restricciones del modelo y las variables del modelo, como: Programación Lineal (LP), Programación No Lineal (NLP), Programación Mixta-Entera tanto Lineal (MILP) como No Lineal (MINLP).

El caso del problema presentado es un problema de programación lineal. Un modelo de programación lineal proporciona un método eficiente para determinar una decisión óptima, (o una estrategia óptima o un plan óptimo) escogida de un gran número de decisiones posibles. El tipo más común de problemas de aplicación de programación lineal, abarca el problema general de asignar recursos limitados entre actividades competitivas de la mejor manera posible (es decir, en forma óptima). La variedad de situaciones a las que se puede aplicar esta descripción es sin duda muy grande, y va desde la asignación de instalaciones de producción a los productos, hasta la asignación de los recursos nacionales a las necesidades de un país; o inclusive para la planeación agrícola.

La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir el problema. La palabra lineal significa, que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser funciones lineales; es decir la función objetivo y cada una de las restricciones. En este caso, la palabra programación no se refiere a programación en computadoras; en esencia es un sinónimo de planeación. Así, la programación lineal trata la planeación de las actividades para obtener un resultado óptimo.

En un problema de programación lineal, lo que sucede es que cada una de las restricciones resulta una línea, y el conjunto de líneas formadas delimitan una región a la que se le conoce como región factible.

La región factible formada es muy importante, pues cualquier posible solución al problema debe estar dentro de la región factible; más aún, la solución óptima se debe de encontrar en alguno de los vértices de esta región.

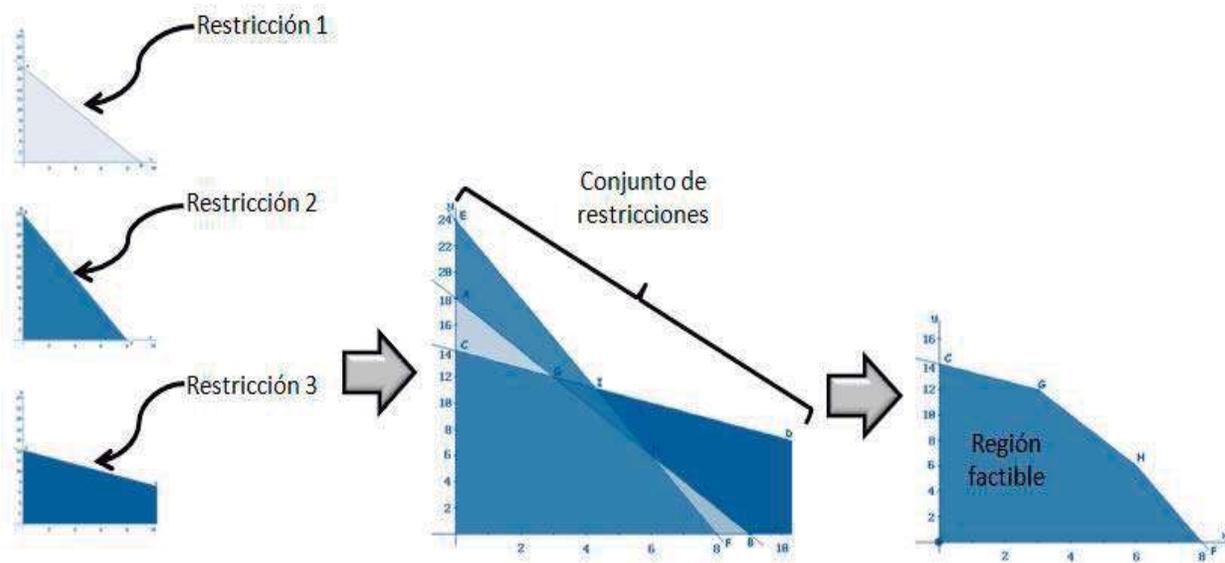


Figura 4. Descripción en dos dimensiones de cómo se forma la región factible en un problema de programación lineal (LP).

Existen varios métodos para resolver problemas de éste tipo, entre los que se encuentran el método Simplex y el método gráfico.

El algoritmo del método simplex es un método de búsqueda sistematizada en los vértices de la región factible; en este método una variable auxiliar es incorporada en todas las restricciones de desigualdad, para convertirlas en restricciones de igualdad, por tanto las restricciones se activan cuando las variables auxiliares correspondientes toman el valor de cero. Está basado en un procedimiento de eliminación Gaussiana para resolver el sistema de ecuaciones formado.

Sin embargo, con el uso de éste método, existen dos complicaciones; la primera es que todas las variables requieren ser positivas ya que esto garantiza que la solución factible puede ser obtenida por una simple relación; y dos, ya que se quiere optimizar una función objetivo lineal, se debe de asegurar que en cada iteración se encuentre un mejor valor de la función objetivo.



Los pasos para realizar la resolución de un problema LP por el método Simplex son los siguientes:

- Convertir las desigualdades en igualdades.
- Igualar la función objetivo a cero.
- Escribir la tabla inicial Simplex.
- Encontrar la variable decisión que entra a la base y la variable de holgura que sale de la base.
- Encontrar los coeficientes de la nueva tabla.

Los pasos anteriores se explican más a detalle en el **APÉNDICE C**, donde se resuelve un ejemplo del método Simplex.

Por otra parte, en muchos problemas de optimización se toma en cuenta más de una función objetivo (MOP), la importancia de los problemas de **optimización** de múltiples objetivos puede ser vista en un gran número de aplicaciones presentadas en la literatura.

Un problema MOP es un problema de decisión que se puede describir como un conjunto de objetivos que se pretenden minimizar o maximizar, sujetos a un conjunto de igualdades y desigualdades.

Los métodos usados para resolver este tipo de problemas se clasifican como generadores y basados en preferencia (**Figura 5**). Los primeros generan un conjunto de soluciones óptimas o conjunto *Pareto* que es un conjunto no dominante; es decir, una colección que representa el compromiso entre los objetivos, para tener información y tomar una decisión. Los métodos basados en preferencia contemplan la cuantificación de la preferencia de los objetivos para tomar una decisión, la cual se identifica con la solución que mayormente se acerque a dichas preferencias.

Ambos métodos presentan fortalezas y debilidades, si bien los métodos basados en preferencias necesitan un menor tiempo de cómputo, muchas veces carecen de información adecuada para tomar una decisión; en cambio, los métodos generadores pueden tener mucha más información pero el tiempo de cómputo es mayor.

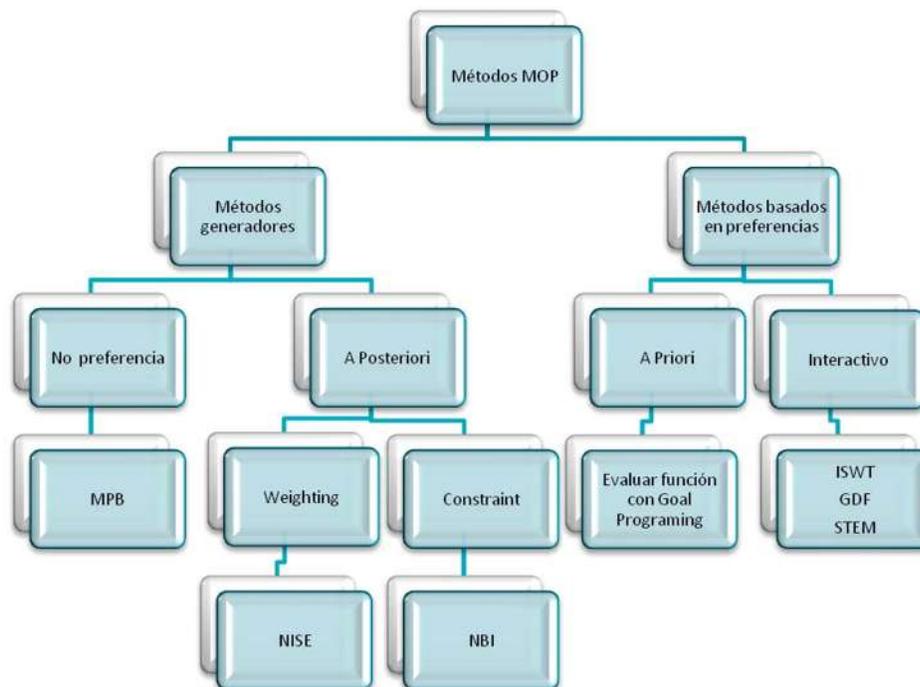


Figura 5. Métodos para resolver problemas del tipo multiobjetivo.

Un problema típico en la industria es el incremento de la ganancia y minimización de las emisiones o el impacto ambiental, en este problema los objetivos se contraponen, pues lo ideal sería que entre mayor fuera la ganancia menor fueran el impacto ambiental; es por eso que se necesita alguna metodología para poder encontrar la solución óptima al problema. Se puede ver un ejemplo de la aplicación de un método generador, con lo cual se nota que se forma una curva *Pareto* (**Figura 6**) en la que se puede observar que ambos objetivos se contraponen entre sí, esto es, la máxima ganancia corresponde al máximo impacto ambiental (Punto B de la **Figura 6**), el otro extremo es la solución correspondiente al mínimo impacto ambiental pues representa la mínima ganancia (Punto A de la **Figura 6**). Entre estas dos soluciones extremo se encuentra un conjunto de soluciones óptimas (conjunto de soluciones *Pareto*) que compensan ambos objetivos, las cuales pueden ser usadas para la toma de decisión y escoger la solución que mejor satisfaga los requerimientos para un caso de estudio específico que es tratado. Los puntos que se encuentran por encima de la curva son puntos sub-óptimos debido a que si nos situamos en cualquiera de ellos; se observa, que siempre se puede obtener un determinado



impacto ambiental, pero sin llegar a la máxima ganancia posible con dicho impacto (se observa desplazándose verticalmente hacia abajo en la **Figura 6**), por otro lado si se define un valor de ganancia, siempre puede alcanzarse un impacto ambiental menor hasta llegar a la curva *Pareto*. (Se observa desplazándose horizontalmente hacia la izquierda en la **Figura 6**). Es importante mencionar que los puntos que se encuentran por debajo de la curva *Pareto* se denominan puntos infactibles; ya que, nunca llegan a cumplir todas las restricciones planteadas en el modelo; esto se puede notar al colocarse en cualquiera de estos puntos; pues no es posible tener un alto beneficio económico sin realizar un gran impacto ambiental.

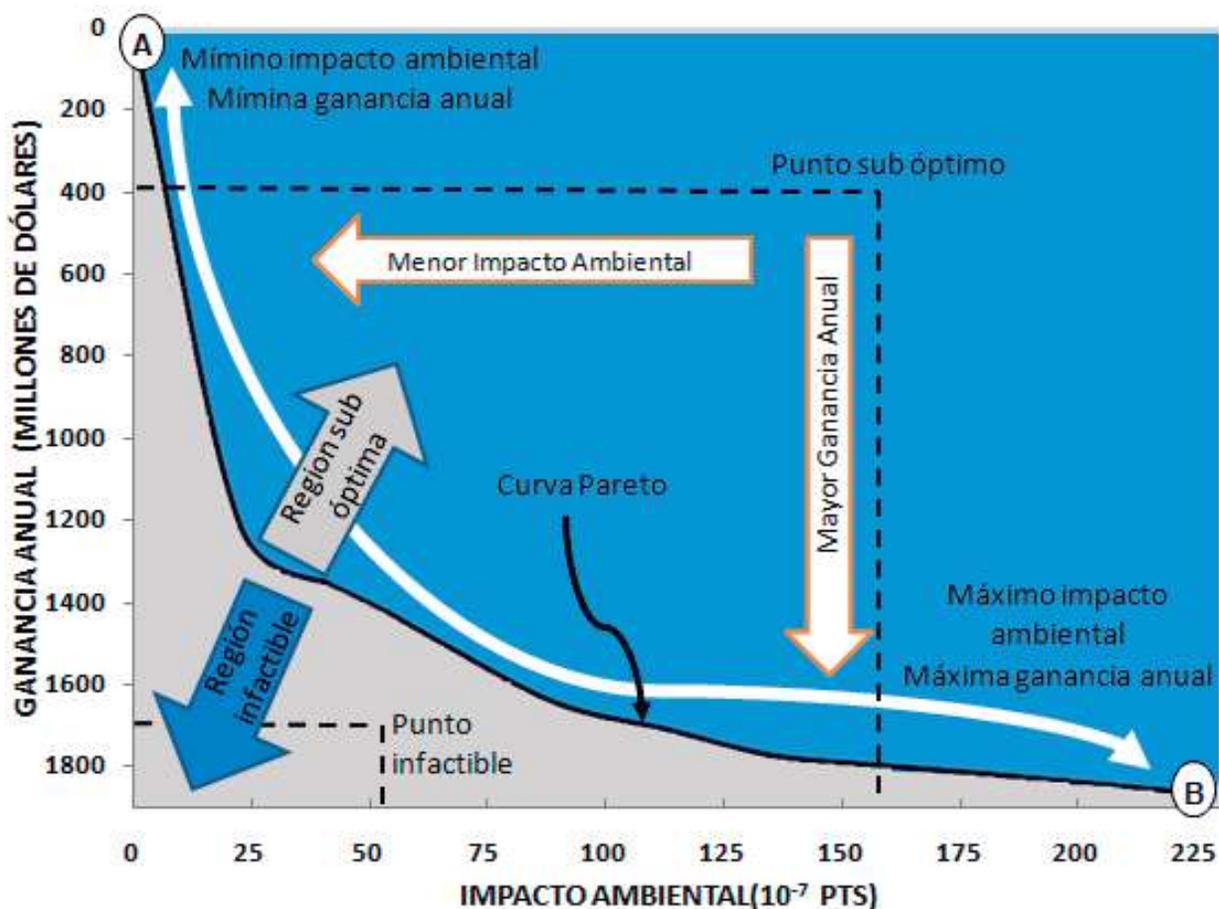


Figura 6. Ejemplo de curva *Pareto*, donde se muestran ejemplos de puntos sub-óptimos e infactibles.



Es importante señalar que la implementación más importante en este modelo, es la consideración de aspectos ambientales, la cual se puede realizar mediante el análisis del ciclo de vida (LCA) de alguna sustancia, proceso o actividad, por medio de Eco-Indicadores, esto con el fin de ver de una manera global el impacto ambiental generado.

De acuerdo a las normas ISO 14040 e ISO 14042, la principal intención de la evaluación del impacto por medio del ciclo de vida, es la de entender de mejor manera los resultados desde la fase de inventario. Hasta el día de hoy, muchas metodologías y métodos se han sugerido y descrito. Estas metodologías pueden dividirse en métodos orientados al tema y métodos orientados al daño. La primera categoría convierte los resultados de inventario a un número de temas, diferente de la segunda que transforma los resultados a partir de los daños causados por el resultado del inventario.



Figura 7. Diagrama del ciclo de vida para la producción de un biocombustible.



Tradicionalmente, el LCA tiene el enfoque de “entre menos mejor”, esto significa que los impactos se evalúan sobre sus efectos potenciales y no sobre su efecto real posible, aunque el cálculo de los efectos reales se puede realizar teniendo más información (p.e., concentración, tiempo de exposición, contenedor, etc.). Varios estudios han demostrado que si se quieren obtener buenos resultados en la evaluación del impacto, los factores del sitio tienen que ser considerados. El problema es que mucha de la información temporal y espacial no se tiene; es decir, para evaluar el impacto real causado por un producto se debe evaluar cada emisión, esto aumentaría la cantidad de información necesaria de manera exorbitante y podría llegar más allá de los límites.

Un aspecto importante en cualquier evaluación del ciclo de vida es la definición de objetivos y el alcance que se quiere, dentro de éstos está la evaluación del impacto, donde lo más importante a considerar es que el método de evaluación de impacto se adapte a dichas metas y alcances.

El concepto de trabajo mediante Eco-Indicadores estándar no es nuevo, ya que se introdujo con el **Eco-Indicador** 95. En este trabajo se implementa el **Eco-Indicador** 99. La diferencia más importante entre estos dos Eco-Indicadores es que la metodología aplicada se ha mejorado en forma importante para calcular los indicadores; ésta es, que el modelo de daños ahora se basa en métodos más científicos y por tanto mucho más fiables; además, que el **Eco-Indicador** 99 considera impactos en diferentes medios de contención como agua, aire y suelo, devolviendo un valor de **Eco-Indicador** para cada uno de ellos.

El método del **Eco-Indicador** 99 es un método orientado al daño y en éste la consideración en cuanto a la zona geográfica se refiere es muy limitada, mientras que no considera la definición temporal; por tanto, los resultados de daño que se pueden obtener por este método no son reales. Este método fue creado a partir de los datos de daños que pueden ocurrir en Europa, por lo que era imposible aplicarlo a otras regiones, aunque se han hecho estudios preliminares probando que el método se puede adaptar a otras regiones, tanto así que desarrollándolo para varias regiones puede obtenerse un modelo para escala continental o mundial, y



posteriormente poderlo mejorar, y adaptarlo para condiciones muy específicas, para así poder evaluar cada proceso en su propia región.

Este método considera once categorías de impacto, dentro de tres categorías principales de daño, las cuales se ponderan para obtener un factor de daño global. Estas categorías se describen a continuación:

1. Daño a la salud humana debido a:
 - a. Sustancias carcinógenas.
 - b. Sustancias orgánicas que dañen en la respiración.
 - c. Sustancias inorgánicas que dañen en la respiración.
 - d. Cambio climático.
 - e. Agotamiento de la capa de ozono.
2. Daño al ecosistema debido a:
 - a. Sustancias eco-tóxicas.
 - b. Acidificación y eutrofización.
 - c. Uso y conversión de la tierra.
3. Daño a los recursos por la extracción de:
 - a. Recursos minerales.
 - b. Combustibles fósiles.

Cada categoría de daño tiene distintas unidades; el daño a la salud humana se mide en DALY por cantidad de sustancia, un DALY son los días de inactividad por año provocados cierta sustancia proceso o actividad. El daño al ecosistema se mide en base al número de especies que desaparecen por utilizar cierta sustancia o realizar una actividad y se da en PDF o PAF por unidad de área. El daño a los recursos es referido a la cantidad de energía necesaria para obtener cierta cantidad de recurso, ya sea mineral o combustible fósil, es por ello que se da en MJ por kg, o bien, MJ por MJ. Es importante destacar que como manejan unidades distintas es necesario ponderarlas para obtener un solo valor de ***Eco-Indicador***.

Para el ***Eco-Indicador*** 99 existen tres perspectivas (jerárquica, igualitaria e individualista) y cada una tiene su propia ponderación para las categorías de daño.

En la perspectiva jerárquica el tiempo elegido es a largo plazo, las sustancias se incluyen si hay consenso en cuanto a su efecto. En la perspectiva jerárquica se supone que los daños son evitables mediante una buena gestión. En el caso de los combustibles fósiles se hace la suposición de que los combustibles fósiles no se pueden reemplazar fácilmente.

En la perspectiva igualitaria el tiempo elegido es a muy largo plazo. Las sustancias se incluyen si no se encuentra ninguna indicación sobre su efecto. En la perspectiva igualitaria, los daños no se pueden evitar y puede dar lugar a eventos catastróficos. En el caso de los combustibles fósiles se hace la suposición de que los combustibles fósiles no pueden ser sustituidos.

En la perspectiva individualista el tiempo elegido es a corto plazo (100 años o menos), las sustancias se incluyen si se ha completado la prueba sobre su efecto. En la perspectiva individualista, se supone que los daños son objeto de reembolso por el desarrollo tecnológico y económico. En el caso de los combustibles fósiles se hace la suposición de que los combustibles fósiles no pueden agotarse. Por lo tanto, quedan fuera de ponderación.

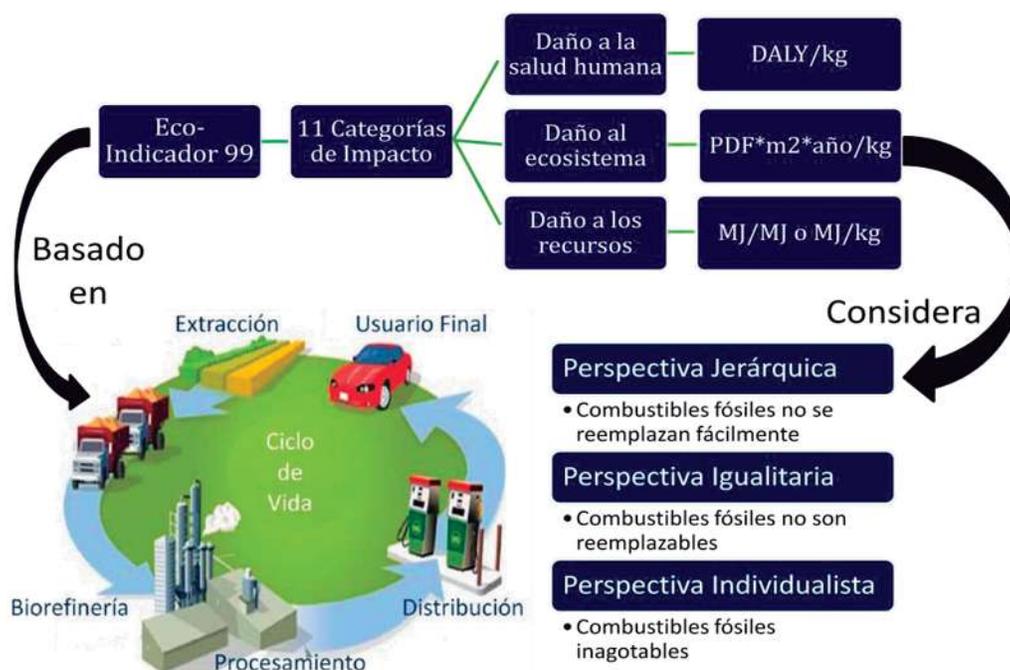


Figura 8. Descripción del método del Eco-Indicador 99.



Es de suma importancia tener en consideración, que para el uso correcto de los Eco-Indicadores, se deben seguir los siguientes pasos:

- Definición del propósito del cálculo de los Eco-Indicadores.
- Definición del ciclo de vida.
- Cuantificación de los materiales y procesos.
- Vaciado de datos.
- Interpretación de los resultados.

Estos pasos se explican con ayuda de un ejemplo en el **Apéndice B**. Por otro lado se debe conocer que los valores estándar de **Eco-Indicador 99** se clasifican en:



Figura 9. Representación de pasos para el cálculo del Eco-Indicador 99



- **Producción de materiales:** Se miden dependiendo de la medida en base a un kg de material. Hay que resaltar que para procesos de producción de materiales, se incluyen todos los procesos, desde la extracción de las materias primas hasta la última fase de la elaboración, que tiene como resultado el material en bruto. Los procesos de transporte relacionados con este proceso se encuentran incluidos, abarcando hasta el último eslabón de la cadena.
- **Procesos de producción:** Abarca el tratamiento y procesado de varios materiales. Cada tratamiento se expresa en una unidad apropiada de acuerdo al proceso (metros cuadrados, kilogramos, mega Joule, etc.). Estos Eco-Indicadores se refieren a las emisiones de proceso en sí y a los procesos para obtener la energía necesaria para llevarlos a cabo. En estos Eco-Indicadores no se incluyen los bienes de equipo, tales como maquinaria, circuitos o troqueles.
- **Procesos de transporte:** Los procesos de transporte incluyen el impacto de las emisiones causadas por la extracción y producción de combustibles y la generación de energía de ese combustible en el transporte. Se expresan normalmente en toneladas por km.
- **Procesos de generación de energía:** Los indicadores de energía se refieren a la extracción y producción de combustibles, así como a la conversión energética, teniendo en cuenta criterios medios de eficiencia, dependiendo del combustible o proceso en el cual se utilice. Se determinan en unidades apropiadas para electricidad o calor.
- **Disposición:** Se expresan por kg de material desechado, pero se sub dividen en los tipos de materiales y los métodos para disponer de ellos. Lo anterior se realiza debido a que no todos los productos se eliminan de la misma forma; es por ello que es importante prestar atención en el método de eliminación adecuado en cada caso; como son, residuos domésticos, residuos urbanos, incineración, uso de vertederos o reciclado.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Metodología

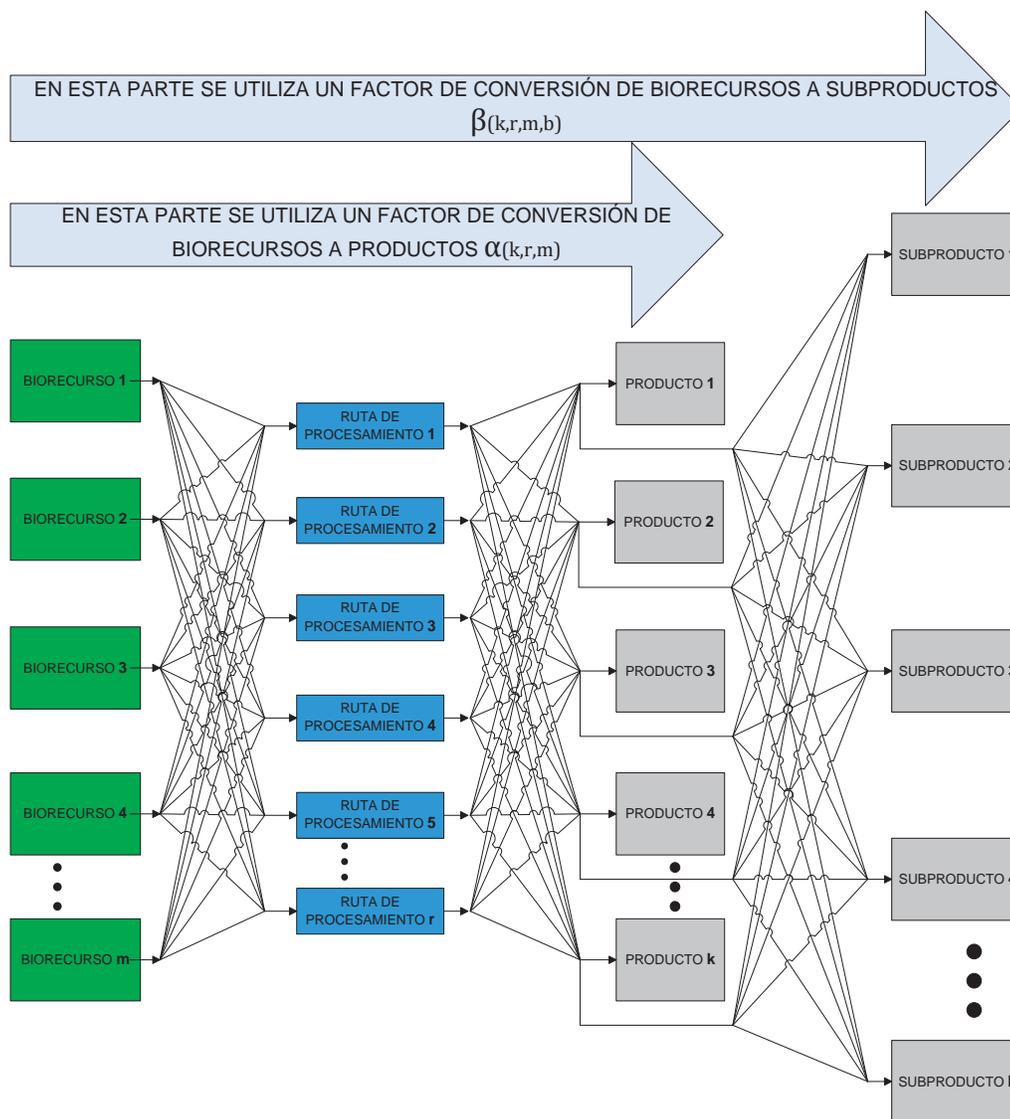


Figura 10. Superestructura propuesta para la planificación óptima de un sistema de producción de biocombustibles.

El problema abordado en este trabajo se puede describir como sigue: dado un conjunto de M alimentaciones disponibles; las cuales pueden ser convertidas en K productos diferentes y a su vez en B subproductos, a través de distintas rutas de



procesamiento R , donde no existe necesariamente una sola opción para obtener los productos requeridos. Cada una de las rutas de procesamiento está asociada a una eficiencia de alimentaciones a productos y alimentaciones a subproductos identificada como factores de conversión (α). La solución óptima se establece con la mejor combinación de estos conjuntos de variables con el máximo beneficio partiendo de considerar aspectos económicos y ambientales. La superestructura para el problema general tratado en este trabajo se presenta en la **Figura 10**. Se observa que esta superestructura representa diferentes opciones para seleccionar a partir de estas la mejor opción. Es importante notar que la decisión se complica conforme el número de posibles opciones se incrementa, siendo el caso del sistema de producción de **biocombustibles** presentado en este trabajo.

Formulación del modelo

Primeramente los índices usados en la formulación del modelo, son definidos: m representa el tipo de alimentación, r representa la ruta de procesamiento empleada para producir los productos a partir de las materias primas, k está asociada al tipo de productos, y b denota a los subproductos producidos. La formulación del modelo se describe como sigue:

Balances de masa

La mayoría de las formulaciones que involucran el procesamiento de materias primas a productos presentan no linealidades, dando problemas no convexos. Debido a la consideración de la conversión de materias primas a productos como una caja negra, el balance de masa puede ser asociado con un factor de eficiencia (conversión) para cada tecnología de procesamiento, y entonces es posible hacer lineal el balance de masa. El número de ecuaciones para estos balances dependen del número de alimentaciones, rutas de procesamiento, productos y subproductos que sean considerados.

Para el producto principal k , producido a partir de la materia prima m , a través de la ruta r , el balance de material se plantea como sigue:

$$P_{kmr} = \alpha_{kmr} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \quad (1)$$

Donde α_{kmr} es el factor de conversión para el producto k a partir del biorecurso m a través de la ruta r . P_{kmr} y F_{kmr} son los flujos de los productos y materias primas respectivamente.

Para el subproducto b producido cuando el producto k es obtenido a partir de la materia prima m a través de la ruta r , se requiere el siguiente balance de masa.

$$B_{kmrb} = \beta_{kmrb} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \quad (2)$$

En la ecuación anterior, β_{kmrb} es el factor de conversión para la cantidad de subproducto b producido cuando el biorecurso m es procesado a través de la ruta r para producir el producto principal k . B_{kmrb} es la velocidad de flujo del subproducto b generado.

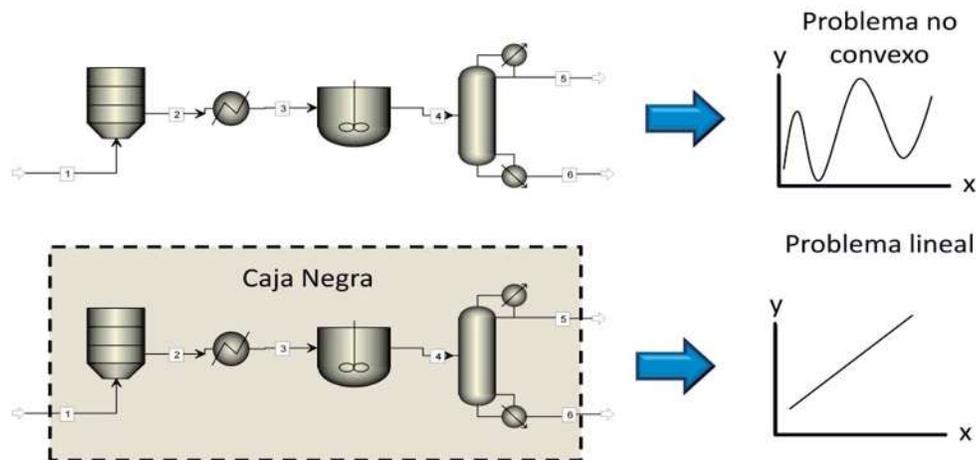


Figura 11. Diferencia en el modelado de un modelo convencional y uno de caja negra para la conversión de materia prima.

Disponibilidad máxima de materias primas

Además de los balances de masa, un conjunto de restricciones de desigualdades son consideradas para la disponibilidad máxima de los biorecursos. Ya que no es posible utilizar una mayor cantidad que la que existe para su procesamiento hasta los correspondientes productos finales. La disponibilidad es restringida por un dato para una región específica, donde el modelo es aplicado y ésta es diferente para cada biorecurso. Las restricciones de la disponibilidad máxima pueden ser planteadas a través de cada ruta de procesamiento (**Figura 12**), y ésta debe ser menor que la cantidad total de alimentación disponible. Estas restricciones pueden ser declaradas como sigue:

$$\sum_k \sum_r F_{kmr} \leq F_m^{\max}, \quad m \in M \quad (3)$$

En la restricción anterior F_m^{\max} es la cantidad máxima disponible para el biorecurso m , y este parámetro debe ser conocido para el proceso de **optimización**.

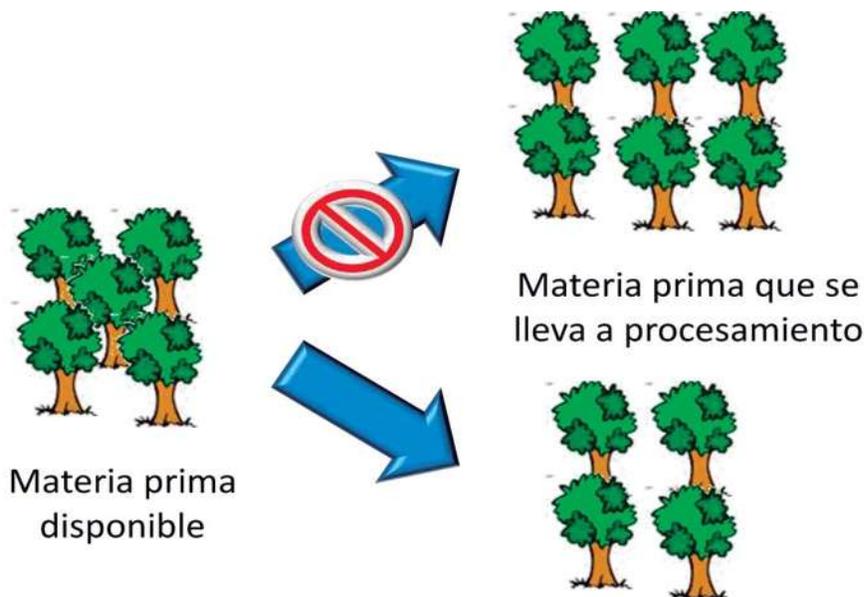


Figura 12. Ejemplo sobre la disponibilidad máxima de materias primas.

Demanda máxima de productos

Otra restricción a considerar es la demanda de los productos para evitar una velocidad de producción mayor que la necesaria pues involucra desperdicio de recursos y no se podría garantizar su consumo (**Figura 13**).

$$\sum_m \sum_r P_{kmr} \leq P_k^{\max}, \quad k \in P \quad (4)$$

P_k^{\max} es un parámetro que representa la demanda máxima del producto principal k .



Figura 13. Ejemplo de restricción sobre la demanda máxima de productos

Límites máximos de procesamiento

Finalmente, además se consideran los límites de procesamiento de materia prima, asociada a una ruta de procesamiento y consecuentemente a un equipo específico. Estas restricciones sólo son los límites máximos, los cuales son la cantidad máxima de materia prima que puede ser procesada en cada una de las tecnologías de procesamiento.

$$P_{kmr} \leq P_{kmr}^{\max}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \quad (5)$$



P_{kmr}^{\max} es la cantidad máxima de producto k que puede ser producido a partir del biorecurso m por medio de la tecnología r .

Función objetivo

La función objetivo considera simultáneamente la maximización del beneficio económico total y la minimización del **impacto ambiental global**, declarándolo como sigue:

$$\text{FunciónObjetivo} = [\max \text{ Ganancia ; min IA}] \quad (6)$$

Donde la Ganancia es el beneficio económico total, obtenido por venta de productos y subproductos menos los costos de materias primas y de procesamiento. Por otro lado IA es el impacto ambiental total con respecto al uso de biorecursos, de productos al igual que del procesamiento. El **impacto ambiental global** es calculado a través del ciclo de vida, porque este considera el uso de recursos y los desperdicios generados. Los objetivos anteriores serán descritos antes de presentar el procedimiento de **optimización**.



Figura 14. Representación del objetivo global, en base a las dos funciones objetivo principales.



Objetivo económico.

La función objetivo económica es formulada en términos de la ganancia anual total. Esta función toma a consideración los costos de alimentaciones, productos, subproductos y rutas de procesamiento, y puede ser declarada como sigue:

$$\begin{aligned}
 \text{Ganancia} = & \sum_k \sum_m \sum_r P_{kmr} C_k^{\text{valor}} + \sum_k \sum_m \sum_r \sum_b B_{kmrb} C_b^{\text{valor}} \\
 & - \sum_k \sum_m \sum_r F_{kmr} C_m^{\text{costo}} - \sum_k \sum_m \sum_r P_{kmr} C_{kmr}^{\text{procesamiento}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Donde C_k^{valor} es el precio neto para el producto k incluyendo el transporte, C_b^{valor} es el precio neto para el subproducto b , C_m^{costo} es el costo para el biorecurso m incluyendo el transporte desde la zona de cultivo hasta la planta de procesamiento, y $C_{kmr}^{\text{procesamiento}}$ es el costo del procesamiento por la ruta r de la materia prima para producir el producto k . Sin embargo, la ecuación (7) usa demasiado tiempo de CPU para la solución del problema. Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (7) se produce la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Ganancia} = & \sum_k \sum_m \sum_r P_{kmr} C_k^{\text{valor}} + \sum_k \sum_m \sum_r \sum_b \beta_{kmrb} F_{kmr} C_b^{\text{valor}} \\
 & - \sum_k \sum_m \sum_r F_{kmr} C_m^{\text{costo}} - \sum_k \sum_m \sum_r P_{kmr} C_{kmr}^{\text{procesamiento}}
 \end{aligned} \tag{8}$$

La ecuación (8) disminuye considerablemente el número de variables en una cantidad de $k \times m \times r \times b$, lo cual ayuda a reducir significativamente el tiempo de CPU al resolver el problema.

Objetivo ambiental.

La evaluación de la función ambiental incluye la medida del **impacto ambiental global** a través del **Eco-Indicador 99** y se define como sigue:



$$IA = \sum_k \sum_m \sum_r F_{kmr} \text{Ecoindicador}_m^{\text{recurso}} + \sum_k \sum_m \sum_r P_{kmr} \text{Ecoindicador}_k^{\text{disposición}} + \sum_k \sum_m \sum_r P_{kmr} \text{Ecoindicador}_{kmr}^{\text{procesamiento}} \quad (9)$$

En la expresión anterior, IA es el **impacto ambiental global**, $\text{Ecoindicador}_m^{\text{recurso}}$, $\text{Ecoindicador}_k^{\text{disposición}}$ and $\text{Ecoindicador}_{kmr}^{\text{procesamiento}}$ son los Eco-Indicadores 99 para los recursos, productos y procesamiento respectivamente.

Para determinar los Eco-Indicadores totales se usó la metodología descrita por Geodkoop y Spriensma²⁹, aplicada a $\text{Ecoindicador}_m^{\text{recurso}}$ para el impacto ambiental debido a la extracción de la materia prima m junto con el transporte desde el lugar de cultivo hasta el de procesamiento, $\text{Ecoindicador}_k^{\text{disposición}}$ considera el impacto ambiental debido por el transporte utilizado y disposición final del producto k , y $\text{Ecoindicador}_{kmr}^{\text{procesamiento}}$ toma en cuenta el impacto ambiental debido a la utilización de la ruta de procesamiento r .



Solución del modelo para un caso de estudio.

Para probar la metodología propuesta, se utilizó un caso de estudio para la planificación de un sistema de producción de **biocombustibles**, el caso de estudio se realizó en un contexto nacional ubicando el sistema de **biocombustibles** en la zona centro del país y tomando en cuenta que la producción de materia prima y demanda de producto corresponden al valor nacional. Este caso involucra 21 biorecursos disponibles en la zona especificada, los cuales pueden ser usados como alimentaciones para obtener tres productos y ocho subproductos; además, existen diez diferentes rutas de procesamiento.



Figura 15. Contexto en el que se desarrolla el caso de estudio.

Es importante observar que aunque este problema corresponde a una región específica de México, el modelo formulado puede ser aplicado a cualquier otra región. Los factores de eficiencia para las diez distintas tecnologías de procesamiento son tomados a través de los resultados previos, obtenidos por: Horta-Nogueira³¹, Trindade³², Lazcano-Martinez³³, Müller-Langer y colaboradores³⁴, y a partir de tecnologías existentes para producción de **biocombustibles** desarrolladas en Brasil, EE. UU., la Unión Europea y algunos países de Latinoamérica y Asia, los cuales tienen desarrolladas e implementadas tecnologías innovadoras en esta materia. Los datos mencionados anteriormente se presentan en la **Tabla 1 y 2**.



Tabla 1. Factores de conversión para diferentes tecnologías de procesamiento expresados como relación de la cantidad de producto respecto a materia prima.

Producto	Materia prima	Ruta de procesamiento	Relación másica
Etanol	Astillas de madera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,1669
Etanol	Astillas de madera	Gasificación y biosíntesis	0,2625
Etanol	Astillas de madera	Gasificación y síntesis química	0,1887
Etanol	Paja de trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,2723
Etanol	Paja de trigo	Producción de etanol con hidrógeno a partir de fermentación oscura	0,1314
Hidrógeno	Aceite de Palma de Concha	Pirolisis catalítica La/AL ₂ O ₃	2,6000
Hidrógeno	Aceite de Palma de Concha	Pirolisis catalítica gama/Al ₂ O ₃	2,6200
Hidrógeno	Paja de arroz	Pirolisis catalítica Cr ₂ O ₃	22,8700
Hidrógeno	Aserrín	Pirolisis catalítica Cr ₂ O ₃	25,7000
Hidrógeno	Aserrín	Pirolisis catalítica Níquel	5,3000
Hidrógeno	Madera comercial	Pirolisis catalítica Cu-MCM-41	0,8700
Etanol	Caña de azúcar	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,0592
Etanol	Trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,2857
Etanol	Grano de maíz	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,3149
Etanol	Grano de sorgo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,2999
Etanol	Raíz de mandioca	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,2999
Etanol	Remolacha azucarera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,0868
Etanol	Sorgo dulce	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	0,0553
Biodiesel	Soya	Extracción y transesterificación con metanol	0,1763
Biodiesel	Palma africana de aceite	Extracción y transesterificación con metanol	0,2064
Biodiesel	Girasol	Extracción y transesterificación con metanol	0,2950
Biodiesel	Higuerilla	Extracción y transesterificación con metanol	0,3543
Biodiesel	Algodón	Extracción y transesterificación con metanol	0,1668
Biodiesel	Colza	Extracción y transesterificación con metanol	0,3595
Biodiesel	Jatropha	Extracción y transesterificación con metanol	0,3268
Biodiesel	Cártamo	Extracción y transesterificación con metanol	0,2850

FUENTE. Calculados a partir de los trabajos de Horta-Nogueira³¹, Trindade³², Lazcano-Martinez³³ y Müller-Langer y colaboradores³⁴.



Tabla 2. Factores de conversión para diferentes tecnologías de procesamiento expresados como relación de la cantidad de subproducto respecto a materia prima.

Producto	Materia prima	Ruta de procesamiento	Subproducto	Relación másica
Etanol	Grano de maíz	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Grano de destilería	0.3333
Etanol	Grano de maíz	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Dióxido de Carbono	0.2850
Etanol	Trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Grano de destilería	0.4300
Etanol	Trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Dióxido de Carbono	0.2560
Etanol	Paja de trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Ácido acético	0.0315
Etanol	Remolacha azucarera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Pulpa seca	0.0125
Etanol	Grano de sorgo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Grano de destilería	0.3333
Etanol	Grano de sorgo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Dióxido de Carbono	0.2850
Etanol	Raíz de mandioca	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Follaje verde	1.5000
Biodiesel	Palma africana de aceite	Extracción y transesterificación con metanol	Palma de aceite	0.0310
Biodiesel	Jatropha	Extracción y transesterificación con metanol	Alimento para ganado	0.6510
Biodiesel	Soya	Extracción y transesterificación con metanol	Alimento para ganado	0.8000
Biodiesel	Colza	Extracción y transesterificación con metanol	Alimento para ganado	0.5000
Biodiesel	Cártamo	Extracción y transesterificación con metanol	Alimento para ganado	0.7280
Biodiesel	Girasol	Extracción y transesterificación con metanol	Alimento para ganado	0.6130
Etanol	Caña de azúcar	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	Dióxido de Carbono	0.0607
Etanol	Paja de trigo	Producción de etanol con hidrógeno a partir de fermentación oscura	Hidrógeno	0.0220
Etanol	Paja de trigo	Producción de etanol con hidrógeno a partir de fermentación oscura	Dióxido de Carbono	0.1400

FUENTE. Calculados a partir de los trabajos de Horta-Nogueira³¹, Trindade³², Lazcano-Martinez³³ y, Müller-Langer y colaboradores³⁴.



La **Tabla 3** muestra los costos de las diferentes rutas de procesamiento a partir de las materias primas disponibles para producir los productos deseados para este caso.

Tabla 3. Costo de procesamiento para diferentes materias primas, rutas de procesamiento y productos.

Producto	Materia prima	Ruta de procesamiento	Costo (USD/TON Procesada)
Etanol	Astillas de madera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	-
Etanol	Astillas de madera	Gasificación y Biosíntesis	-
Etanol	Astillas de madera	Gasificación y síntesis química	-
Etanol	Paja de trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	38.29
Etanol	Paja de trigo	Producción de etanol con hidrógeno a partir de fermentación oscura	-
Hidrógeno	Aceite de Palma de Concha	Pirolisis catalítica La/AL ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Aceite de Palma de Concha	Pirolisis catalítica gamma/Al ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Paja de arroz	Pirolisis catalítica Cr ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Aserrín	Pirolisis catalítica Cr ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Aserrín	Pirolisis catalítica Níquel	-
Hidrógeno	Madera comercial	Pirolisis catalítica Cu-MCM-41	-
Etanol	Caña de azúcar	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	30.4
Etanol	Trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	50.68
Etanol	Grano de maíz	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	55.86
Etanol	Grano de sorgo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	53.2
Etanol	Raíz de mandioca	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	88.2
Etanol	Remolacha azucarera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	27.5
Etanol	Sorgo dulce	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	16.1
Biodiesel	Soya	Extracción y transesterificación con metanol	47.02
Biodiesel	Palma de aceite	Extracción y transesterificación con metanol	55.05
Biodiesel	Girasol	Extracción y transesterificación con metanol	78.67
Biodiesel	Higuerilla	Extracción y transesterificación con metanol	94.5
Biodiesel	Algodón	Extracción y transesterificación con metanol	44.5
Biodiesel	Colza	Extracción y transesterificación con metanol	95.87
Biodiesel	Jatropha	Extracción y transesterificación con metanol	87.16
Biodiesel	Cártamo	Extracción y transesterificación con metanol	76.01

FUENTE. Calculados a partir de los trabajos de Horta-Nogueira³¹, Trindade³², Lazcano-Martinez³³ y, Müller-Langer y colaboradores³⁴.



Adicionalmente los datos requeridos para cada una de las alimentaciones, productos y subproductos; en cuanto a costos, disponibilidad y demanda pueden ser tomados desde instituciones gubernamentales donde el modelo sea aplicado. En el caso de México, estos datos pueden ser tomados a partir de instituciones como la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría de Energía (SENER), Secretaría de Economía (SE), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y la Secretaría de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP); y para el caso de EE. UU. ésta información se podría tomar a través del Departamento de Energía (DOE) y el Departamento de Agricultura (USDA). Para el caso de estudio presentado en éste trabajo, los datos fueron tomados de SAGARPA-SIAP³⁵ y SEMARNAT³⁶.

Tabla 4. Disponibilidad y costo por uso de material prima para producción de biocombustibles en México.

Materia prima	Costo (USD/TON)	Disponibilidad (Ton/año)
Astillas de madera	86,60	190600,57
Paja de trigo	38,85	52559,77
Aceite de Palma de Concha	367,89	0,00
Paja de arroz	-	0,00
Aserrín	0,00	13672,93
Madera comercial	60,62	69005,34
Caña de azúcar	28,98	51090720,79
Trigo	286,10	1902794,67
Grano de maíz	207,40	1573914,77
Grano de sorgo	167,77	6593050,48
Raíz de mandioca	230,71	13639,50
Remolacha azucarera	150,29	167,00
Sorgo dulce	31,11	5032396,62
Soya	330,58	153022,20
Palma de aceite	66,31	307756,87
Girasol	12,66	111208,00
Higuerilla	533,84	8,50
Algodón	361,89	365226,98
Colza	227,08	503,86
Jatropha	110,40	529,80
Cártamo	269,07	95831,27

FUENTE. SEMARNAT y SIAP con información de delegaciones de SAGARPA 2009.



Adicionalmente las **Tablas 5** y **6** muestran los costos y las demandas para los productos y subproductos respectivamente.

Tabla 5. Costo y demanda de productos para el escenario propuesto.

Producto	Costo (USD/Ton)	Demanda (Ton/Año)	Escenario propuesto
Etanol	696,82	3,616,888	Considerando 10% de etanol en toda la gasolina
Hidrógeno	2470	375,482,918	Considerando 20% de la demanda de gas natural
Biodiesel	841	814,000	Considerando % de biodiesel en todo el biodiesel convencional

FUENTE. Programa de producción de Bioenergéticos de la SENER.

Tabla 6. Costo de subproducto producido a través de diferentes alimentaciones.

Subproductos	Materia prima	Costo de subproductos (USD/Ton)
Grano de destilería	Trigo	140.06
Grano de destilería	Grano de maíz	140.06
Grano de destilería	Grano de sorgo	140.06
Pulpa seca	Remolacha azucarera	112.04
Follaje verde	Raíz de mandioca	9.80
Aceite de palma	Palma africana de aceite	634.92
Alimento para ganado	Jatropha	72.92
Alimento para ganado	Soya	201.21
Alimento para ganado	Colza	93.37
Alimento para ganado	Cártamo	40.43
Alimento para ganado	Girasol	60.97
Hidrógeno	Astillas de madera	2470

FUENTE. Calculados a partir de los trabajos de Horta-Nogueira³¹, Trindade³², Lazcano-Martinez³³ y, Müller-Langer y colaboradores³⁴.

Los datos para el impacto ambiental fueron obtenidos por la aplicación de la metodología del análisis del ciclo de vida por la consideración de los productos, procesos y actividades asociadas como el transporte y generación de desechos. Estos fueron cuantificados con el **Eco-Indicador 99**^{29,37}. Como se mencionó anteriormente, se determinó un **Eco-Indicador 99** para cada alimentación, producto y tecnología de procesamiento, los valores de **Eco-Indicador 99** para los conceptos



anteriores, desde el nacimiento hasta la su disposición final son reportados en las **Tablas 7, 8 y 9**; respectivamente.

Tabla 7. Eco-Indicador 99 para cada alimentación.

Materia prima	Eco-Indicador 99/Ton
Astillas de madera	211.12
Paja de trigo	146.09
Aceite de Palma de Concha	14.61
Paja de arroz	0.00
Aserrín	169.32
Madera comercial	169.32
Caña de azúcar	12.14
Trigo	146.09
Grano de maíz	199.78
Grano de sorgo	250.56
Raíz de mandioca	62.47
Remolacha azucarera	48.33
Sorgo dulce	41.84
Soya	444.06
Palma de aceite	14.61
Girasol	2.04
Higuerilla	631.69
Algodón	245.08
Colza	404.00
Jatropha	14.61
Cártamo	614.38

FUENTE. Datos obtenidos a partir de la metodología de Geodkoop, M.; Spriensma, R.²⁹ presentada en su manual de diseñadores.

Tabla 8. Eco-Indicador 99 por cantidad de producto producido y usado como biocombustible de acuerdo al escenario propuesto.

Producto	Eco-Indicador-99/Ton
Etanol	32.12
Hidrógeno	0
Biodiesel	10.15

FUENTE. Datos obtenidos a partir de la metodología de Geodkoop, M.; Spriensma, R.²⁹ presentada en su manual de diseñadores.



Tabla 9. Eco-Indicador 99 por cantidad de alimentación procesada para la producción de biocombustibles.

Producto	Materia prima	Ruta de procesamiento	Eco-Indicador-99/Ton
Etanol	Astillas de madera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	39.31
Etanol	Astillas de madera	Gasificación y Biosíntesis	9.90
Etanol	Astillas de madera	Gasificación y síntesis química	10.39
Etanol	Paja de trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	11.84
Etanol	Paja de trigo	Producción de etanol con hidrógeno a partir de fermentación oscura	0.70
Hidrógeno	Aceite de Palma de Concha	Pirolisis catalítica La/AL ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Aceite de Palma de Concha	Pirolisis catalítica gamma/Al ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Paja de arroz	Pirolisis catalítica Cr ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Aserrín	Pirolisis catalítica Cr ₂ O ₃	-
Hidrógeno	Aserrín	Pirolisis catalítica Níquel	-
Hidrógeno	Madera comercial	Pirolisis catalítica Cu-MCM-41	-
Etanol	Caña de azúcar	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	1.84
Etanol	Trigo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	13.10
Etanol	Grano de maíz	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	17.16
Etanol	Grano de sorgo	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	5.85
Etanol	Raíz de mandioca	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	42.05
Etanol	Remolacha azucarera	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	2.75
Etanol	Sorgo dulce	Pretratamiento, hidrólisis ácida y fermentación	5.85
Biodiesel	Soya	Extracción y transesterificación con metanol	9.02
Biodiesel	Palma de aceite	Extracción y transesterificación con metanol	10.56
Biodiesel	Girasol	Extracción y transesterificación con metanol	15.09
Biodiesel	Higuerilla	Extracción y transesterificación con metanol	18.13
Biodiesel	Algodón	Extracción y transesterificación con metanol	8.54
Biodiesel	Colza	Extracción y transesterificación con metanol	18.39
Biodiesel	Jatropha	Extracción y transesterificación con metanol	16.72
Biodiesel	Cártamo	Extracción y transesterificación con metanol	14.58

FUENTE. Datos obtenidos a partir de la metodología de Geodkoop, M.; Spriensma, R.²⁹ presentada en su manual de diseñadores.



Para la solución del problema se implementó el método constraint presentado por Diwekar³⁰; con él se determinó el conjunto de soluciones óptimas que compensan ambos objetivos y que producen la curva *Pareto*, declarando el problema como sigue:

$$\text{Función Objetivo} = [\max \text{ Ganancia ; min IA}]$$

sujeta a

$$\left. \begin{aligned} P_{kmr} &= \alpha_{kmr} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ B_{kmrb} &= \beta_{kmrb} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ \sum_k \sum_r F_{kmr} &\leq F_m^{\max}, \quad m \in M \\ \sum_m \sum_r P_{kmr} &\leq P_k^{\max}, \quad k \in P \\ P_{kmr} &\leq P_{kmr}^{\max}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \end{aligned} \right\} \text{Ecuaciones (1) – (5)} \quad (10)$$

Donde la *Ganancia* e *IA* son definidos en las ecuaciones (7) y (8), respectivamente.

Primeramente se determina el punto A de la **Figura 15**, se minimizó el *IA* sin tomar en cuenta la *Ganancia* resolviéndose como sigue:

min *IA*

sujeto a

$$\left. \begin{aligned} P_{kmr} &= \alpha_{kmr} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ B_{kmrb} &= \beta_{kmrb} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ \sum_k \sum_r F_{kmr} &\leq F_m^{\max}, \quad m \in M \\ \sum_m \sum_r P_{kmr} &\leq P_k^{\max}, \quad k \in P \\ P_{kmr} &\leq P_{kmr}^{\max}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \end{aligned} \right\} \text{Ecuaciones (1) – (5)} \quad (11)$$



Esta solución del problema usualmente produce la mínima *Ganancia* en la curva *Pareto*, porque este modelo no considera la *Ganancia*, en este caso produjo valores de *IA* y *Ganancia* iguales a cero puntos de impacto y cero millones de Dólares respectivamente. (Lo cual significa que no se tiene producción).

El siguiente paso es determinar el punto C de la **Figura 15**, que ocurre con la maximización del *la Ganancia* sin considerar el *IA*, quedando como sigue:

max *Ganancia*

sujeta a

$$\left. \begin{aligned} P_{kmr} &= \alpha_{kmr} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ B_{kmrb} &= \beta_{kmrb} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ \sum_k \sum_r F_{kmr} &\leq F_m^{\max}, \quad m \in M \\ \sum_m \sum_r P_{kmr} &\leq P_k^{\max}, \quad k \in P \\ P_{kmr} &\leq P_{kmr}^{\max}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \end{aligned} \right\} \text{Ecuaciones (1) – (5)} \quad (12)$$

Esta solución arrojó los resultados para el *IA* y *la Ganancia* iguales a 2.2546×10^9 puntos de impacto y 1,8539 millones de dólares, respectivamente. Se puede notar el gran rango que existe entre el mínimo y el máximo impacto ambiental, identificados en la curva *Pareto*. Esta es la solución es la que se puede observar usualmente en los modelos previos, produciendo el máximo *IA* en la curva *Pareto*.



Estas dos soluciones extremos (las soluciones dadas por los puntos A y C con las relaciones entre las ecuaciones (11) y (12), respectivamente) son usadas como límites de la curva *Pareto* producida para poder resolver el problema como sigue:

max *Ganancia*

sujeta a

$$IA \leq \varepsilon$$

$$\left. \begin{aligned} P_{kmr} &= \alpha_{kmr} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ B_{kmrb} &= \beta_{kmrb} F_{kmr}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \\ \sum_k \sum_r F_{kmr} &\leq F_m^{\max}, \quad m \in M \\ \sum_m \sum_r P_{kmr} &\leq P_k^{\max}, \quad k \in P \\ P_{kmr} &\leq P_{kmr}^{\max}, \quad k \in P, m \in M, r \in R \end{aligned} \right\} \text{Ecuaciones (1) – (5)} \quad (13)$$

Para producir la curva *Pareto*, el problema dado por las relaciones en (13), es resuelto para diferentes valores de ε . Los límites para ε son los *IA* obtenidos en las soluciones A y C, que corresponden al máximo y mínimo impacto ambiental.

Es importante hacer notar que la curva *Pareto* representa un conjunto de soluciones óptimas, que muestran el compromiso entre ambos objetivos simultáneamente y a partir de la cual se puede tomar una decisión que satisfaga de la mejor manera los requerimientos específicos para el caso de estudio. En este caso se eligió una valor de aproximadamente un cuarto del máximo impacto ambiental y alrededor de 75% de la máxima ganancia anual, que es el punto B de la **Figura 16**.

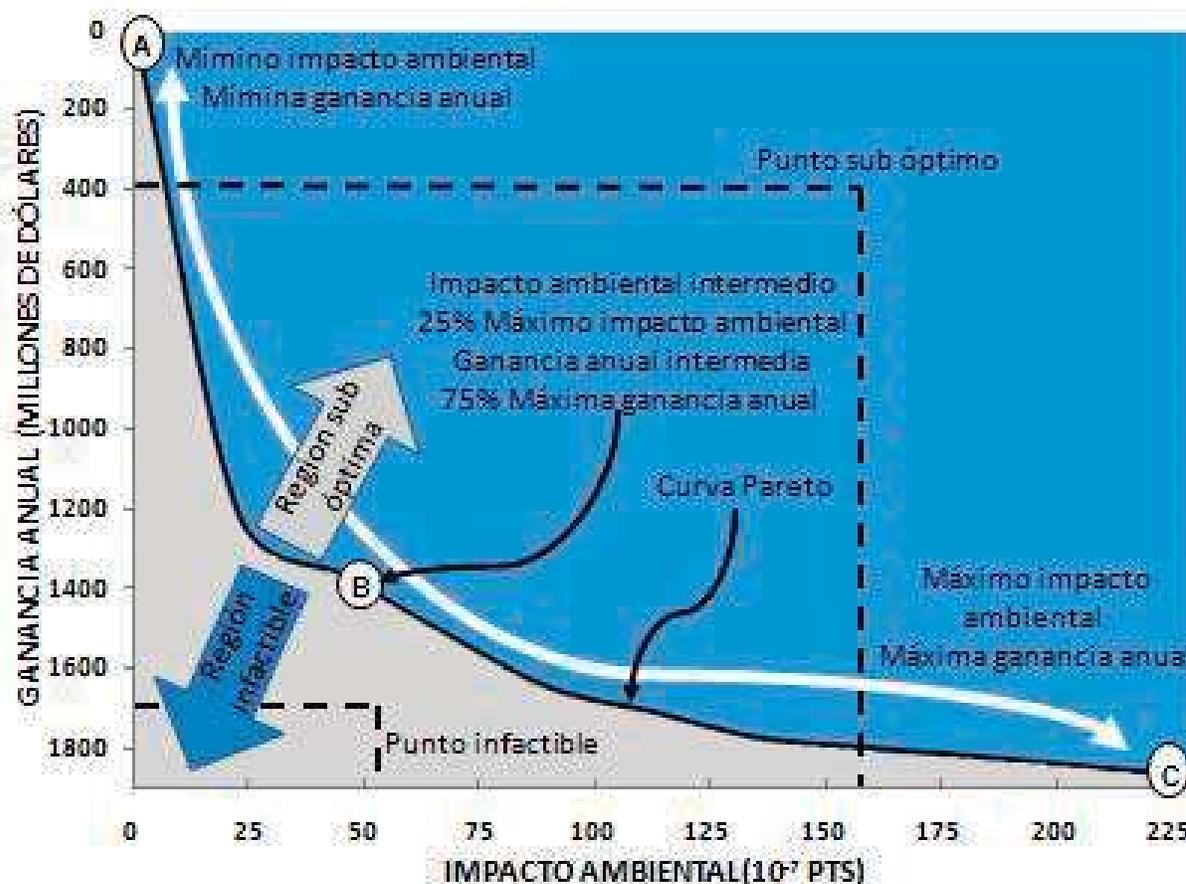


Figura 16. Solución Pareto para el caso de estudio.

Dado a que el modelo formulado resulta de forma lineal; es decir, la función objetivo y cada una de sus restricciones es lineal; cada punto de la curva Pareto puede ser determinado por medio de algún método de Programación Lineal.

Para la solución de éste problema se utilizó el resolvidor CPLEX del lenguaje GAMS, el cual puede resolver problemas del tipo: lineal, mixto entero y de programación cuadrática. El resolvidor CPLEX basa su algoritmo en el método Simplex, utilizando el método Dual Simplex, el cual aprovecha la particularidad de que cada problema de programación lineal tiene un segundo problema asociado con él. Uno se denomina primal y el otro dual. Los dos poseen propiedades muy relacionadas, de tal manera que la solución óptima a un problema proporciona información completa sobre la solución óptima para el otro.

Las relaciones entre el primal y el dual se utilizan para reducir el esfuerzo de cómputo en ciertos problemas y para obtener información adicional sobre las



variaciones en la solución óptima debidas a ciertos cambios en los coeficientes y en la formulación del problema. Esto se conoce como análisis de sensibilidad

Para poder elaborar el problema dual a partir del primal, este se debe presentar en su forma canónica. Además, el problema dual se puede obtener a partir del problema primal y viceversa de la siguiente manera:

- Cada restricción de un problema corresponde a una variable en el otro.
- Los elementos del lado derecho de las restricciones en un problema son iguales a los coeficientes respectivos de la función objetivo en el otro.
- Un problema busca maximizar y el otro minimizar.
- El problema de maximización tiene restricciones “menor qué” y el problema de minimización tiene restricciones “mayor qué”.

Se debe tomar en cuenta que las variables en ambos casos son no negativas.



ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El problema fue formulado en el lenguaje General Algebraic Modeling System (GAMS) ³⁸. El modelo consiste de 1262 variables, 664 restricciones y cada una de las soluciones de la curva *Pareto*, fue resuelta usando el resolvidor CPLEX en menos de 0.016 segundos de tiempo de CPU, con un procesador i7 a 2.67 GHz con 9 GB de RAM. Los resultados para las soluciones de los puntos B y C de la **Figura 16** se muestran a continuación:

Tabla 10. Solución de caso B (Ganancia igual a 1394 Millones de dólares e Impacto ambiental igual a 51×10^7 PTS).

Materia prima (Ton/Año)		Producto (Ton/Año)		Ruta de procesamiento
Paja de trigo	52559.77	Etanol	14312.03	P. hidrólisis ácida y fermentación
Caña de azúcar	2.97×10^7	Etanol	1.76×10^6	P. hidrólisis ácida y fermentación
Aserrín	1.37×10^4	Hidrógeno	3.51×10^5	Pirolisis catalítica con Cr ₂ O ₃
Madera comercial	6.90×10^4	Hidrógeno	6.00×10^4	Pirolisis catalítica con Cu-MCM-41
Palma africana	3.08×10^5	Biodiesel	63521.02	P. Extracción y transesterificación
Girasol	1.11×10^5	Biodiesel	32806.36	P. Extracción y transesterificación
Jatropha	529.80	Biodiesel	173.14	P. Extracción y transesterificación

Tabla 11. Solución de caso C (Ganancia igual a 1853 Millones de dólares e Impacto ambiental igual a 225×10^7 PTS).

Materia prima (Ton/Año)		Producto (Ton/Año)		Ruta de procesamiento
Astillas de madera	1.91×10^5	Etanol	50032.65	P. gasificación y biosíntesis
Paja de trigo	52559.77	Etanol	14312.025	P. hidrólisis ácida y fermentación
Caña de azúcar	2.66×10^7	Etanol	1575300	P. hidrólisis ácida y fermentación
Grano de sorgo	6.59×10^6	Etanol	1.98×10^6	P. hidrólisis ácida y fermentación
Aserrín	1.37×10^4	Hidrógeno	3.51×10^5	Pirolisis catalítica con Cr ₂ O ₃
Madera comercial	6.90×10^4	Hidrógeno	6.00×10^4	Pirolisis catalítica con Cu-MCM-41
Palma africana	3.08×10^5	Biodiesel	63521.018	P. Extracción y transesterificación
Girasol	1.11×10^5	Biodiesel	32806.36	P. Extracción y transesterificación
Colza	503.86	Biodiesel	181.138	P. Extracción y transesterificación
Jatropha	529.8	Biodiesel	173.139	P. Extracción y transesterificación



Se puede observar que ninguna de las soluciones involucra uso de materias primas de grado alimenticio.

La **Figura 17** muestra los diagramas para las soluciones de los casos B y C identificados en la curva *Pareto* de la **Figura 16**. En lo que respecta a la producción de etanol, la comparación entre el punto encontrado y el de máxima ganancia, muestra que en el primero se llega a cubrir una demanda del 50% de etanol, usando 10% de astillas de madera y 60% de caña de azúcar. Sin embargo, en el segundo caso (solución C), además de utilizar las astillas de madera y la caña de azúcar, es necesario aproximadamente el 50% del sorgo disponible para abastecer la demanda de etanol; sin embargo, la producción de sorgo por hectárea es menor que la de caña de azúcar, observándose que el modelo considera el uso y la conversión de tierra.

Respecto al biodiesel; en la solución b) de la **Figura 17** aparece la semilla de colza. Sin embargo, ésta producción es extremadamente baja y esto hace que no se incremente el abastecimiento de la demanda de biodiesel, con respecto a la solución a) de la **Figura 17**.

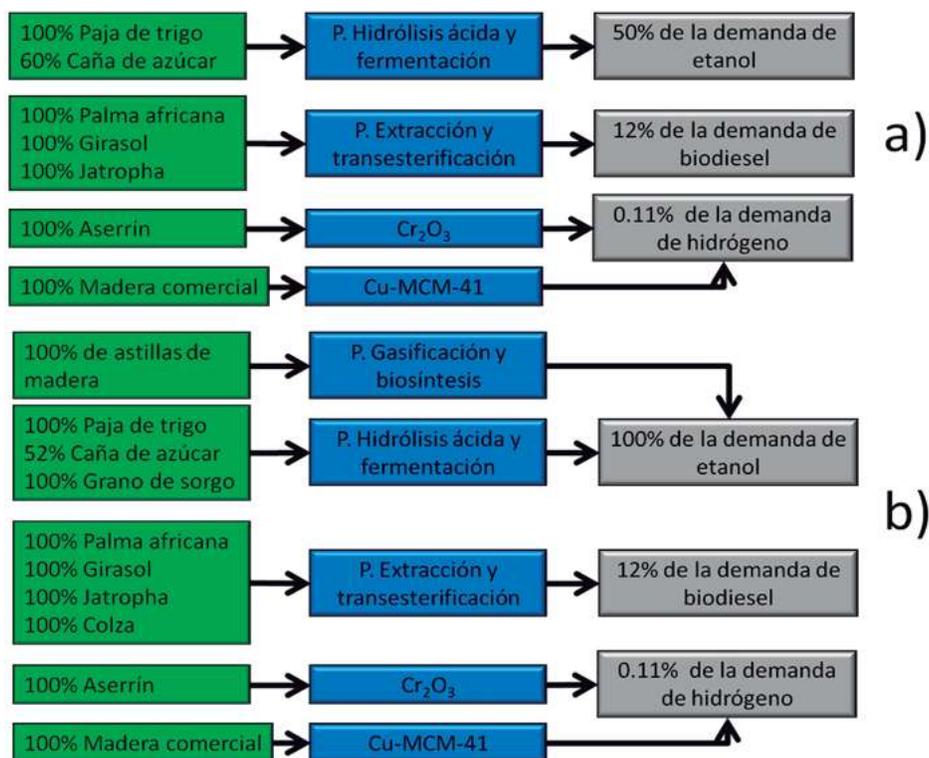


Figura 17. Diagrama de flujo para (a) Solución B y (b) Solución C de la curva *Pareto*.



La *Jatropha* por su parte, aparece como parte de la solución óptima, y aunque en los registros oficiales en México previos al 2009, ésta no se tiene en gran cantidad, se espera que su producción aumente de manera considerable en registros posteriores; alrededor del año 2011, pues la *Jatropha* tarda aproximadamente 5 años en estabilizar su producción de semilla; con lo cual se espera que aumente el cumplimiento de la demanda de biodiesel desde un 30% hasta 50%.

Enfocándose en el caso de la producción de hidrógeno, se observa que no cambia respecto de la primera y segunda parte de la curva *Pareto*, pues la producción es extremadamente baja y no se cumple en su totalidad, de acuerdo al escenario propuesto. Sin embargo, se observa un repentino cambio en la ganancia pero no así en el impacto ambiental. Esto es un buen indicativo que el hidrógeno es un biocombustible más limpio que el etanol o biodiesel discutidos previamente. Sin embargo, hay que hacer énfasis, que el hidrógeno si impacta al ambiente, porque el impacto ambiental involucra desde la extracción de la alimentación para la producción del hidrógeno hasta su posterior combustión.

Es de suma importancia resaltar, que en ningún caso, se utilizan materias primas de grado alimenticio.

Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad basado en la disponibilidad de la caña de azúcar, considerando un decremento desde 100% hasta 0% de disponibilidad de caña de azúcar usando intervalos de 20 puntos porcentuales. Para cada escenario analizado, se observa que cuando la disponibilidad de caña de azúcar disminuye, también lo hace proporcionalmente la ganancia total, además ocurre lo opuesto con el ***impacto ambiental global***.

Esto se debe, a que la caña de azúcar sólo puede ser usada para la producción de etanol (**Tabla 1**); lo que conlleva que para mantener o incrementar la producción de etanol, se deben de usar distintas materias primas como sorgo, madera, etc. en lugar de la caña de azúcar; sin embargo, el uso de estas distintas



materias primas produce una disminución en la ganancia y simultáneamente un incremento en el impacto ambiental.

La **Figura 18** muestra los resultados del análisis de sensibilidad, para el caso cuando la disponibilidad de caña de azúcar disminuye. La línea para el 100% de disponibilidad de caña de azúcar funciona como línea base, los otros casos representan como baja esta disponibilidad. Se observa que cuando la disponibilidad de caña de azúcar disminuye, la curva *Pareto* es desplazada hacia la zona de soluciones sub-óptimas.

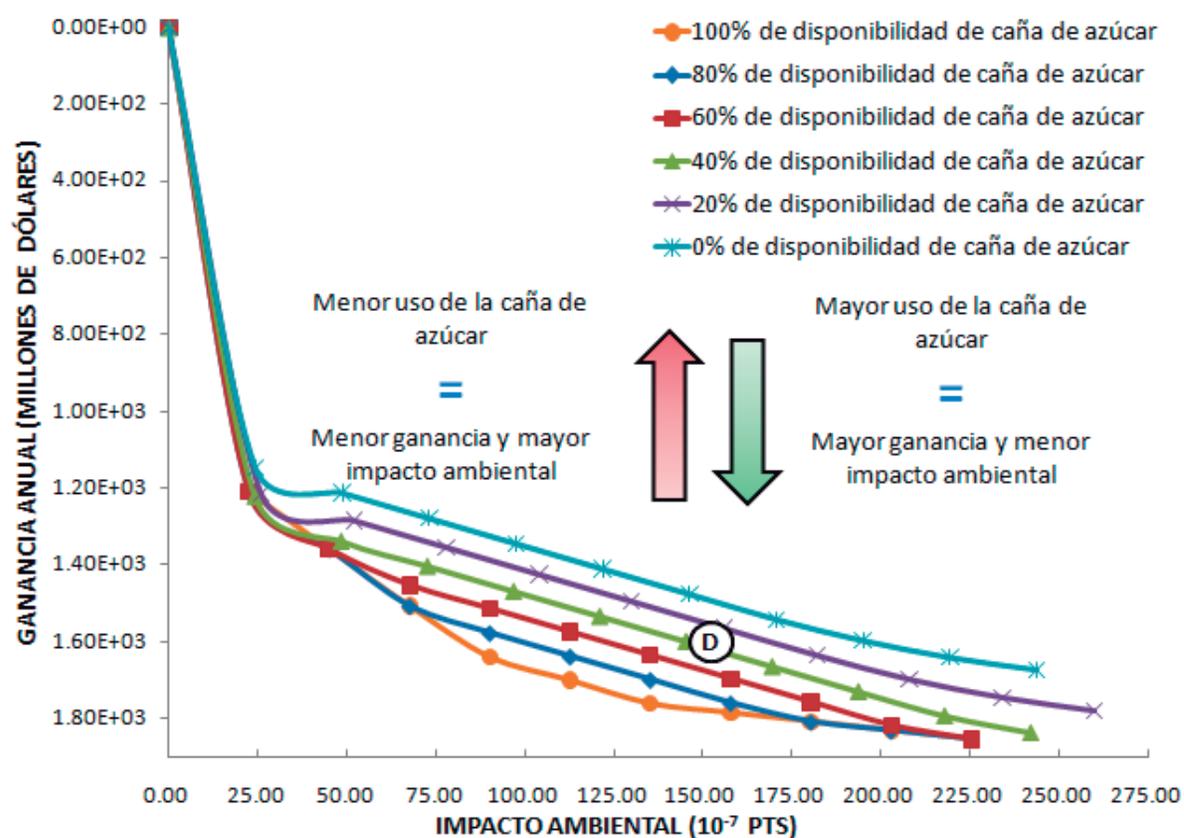


Figura 18. Análisis de sensibilidad para diferentes valores de disponibilidad de caña de azúcar.



Un ejemplo de estas soluciones se presenta en la **Tabla 12**, la cual presenta la solución cuando la disponibilidad de caña de azúcar es 40% de la original; en este caso el impacto ambiental resulta un poco menor de 145×10^7 puntos de **Eco-Indicador** 99, esta solución se identifica con la letra D en la **Figura 15** y representa una ganancia de 1,600 millones de dólares por año. Estos resultados muestran que la metodología propuesta puede ser usada para analizar diferentes escenarios considerando simultáneamente aspectos económicos y ambientales.

Tabla 12. Solución de caso D (Ganancia igual a 1600 Millones de dólares e Impacto ambiental igual a 145×10^7 PTS para una disponibilidad de caña de azúcar de 40% de la máxima disponible).

Materia prima (Ton/Año)		Producto (Ton/Año)		Ruta de procesamiento
Astillas de madera	1.91×10^5	Etanol	31811.14	P. Gasificación y Biosíntesis
Paja de trigo	52559.77	Etanol	14312.023	P. hidrólisis ácida y fermentación
Caña de azúcar	2.04×10^7	Etanol	1207680	P. hidrólisis ácida y fermentación
Grano de sorgo	3.95×10^6	Etanol	1184605	P. hidrólisis ácida y fermentación
Aserrín	1.37×10^4	Hidrógeno	3.51×10^5	Pirolisis catalítica con Cr ₂ O ₃
Madera comercial	6.90×10^4	Hidrógeno	6.00×10^4	Pirolisis catalítica con Cu-MCM-41
Palma Africana	3.08×10^5	Biodiesel	63521.02	P. Extracción y transesterificación
Girasol	1.11×10^5	Biodiesel	32806.36	P. Extracción y transesterificación
Jatropha	529.80	Biodiesel	173.14	P. Extracción y transesterificación



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presenta una nueva formulación matemática para la planificación de un sistema de producción de **biocombustibles** considerando simultáneamente la maximización de la ganancia neta anual y la minimización del **impacto ambiental global**, ya que en formulaciones anteriores sólo se considera el aspecto económico y hacen al aspecto ambiental una función de las sanciones económicas que puede recibir una empresa por no cumplir los parámetros establecidos en la legislación vigente.

El método utilizado para resolver el problema multiobjetivo (Método constraint) representa adecuadamente las funciones objetivo, porque se observa cómo estos objetivos se contraponen entre sí.

El modelo resultante es un problema de programación lineal que puede ser resuelto sin complicaciones numéricas.

El modelo fue aplicado exitosamente para el estudio de un sistema de producción de **biocombustibles** en México, considerando la disponibilidad específica de biorecursos para esa región.

Los resultados muestran que el modelo puede ayudar a resolver problemas respecto de la producción de **biocombustibles** a partir de materias primas de grado alimenticio; ya que éstas no fueron consideradas en la solución óptima. Finalmente el modelo es general y puede ser aplicado a otros casos diferentes (p. e; diferentes localizaciones, materias primas, productos rutas de procesamiento).

Respecto del caso de estudio analizado en el presente trabajo sobre la producción de biocombustibles en México, se encontró que para la producción de etanol se recomienda principalmente el uso de caña de azúcar como materia prima a través de la tecnología de procesamiento que consiste en un pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación (debido a sus costos e impacto ambiental), pues el uso de otra materia prima diferente desplaza la solución óptima hacia la región sub-óptima. Para la producción de biodiesel la materia prima principal es la *Jatropha* utilizando la tecnología de pretratamiento y transesterificación con metanol. Finalmente para la producción de hidrogeno se recomienda el uso de aserrín; ya que, es una materia



prima con poca competencia respecto a su uso, comparado con la madera comercial, por medio de pirolisis catalítica utilizando óxido de cromo como catalizador. Adicionalmente, los resultados son enfocados hacia la producción de etanol debido a que actualmente sus tecnologías son las más estudiadas y numerosas, con lo cual es el biocombustible que se puede producir a un plazo más corto.

El modelo está limitado a un cierto periodo de tiempo; sin embargo, puede ayudar a realizar trabajos posteriores, tales como, calendarización de la producción, (ya que no todas las materias primas están disponibles todo el tiempo) o bien localización de plantas de procesamiento o almacenes (pues en cada región existe un costo y una disponibilidad o demanda específica para las materias primas o productos).



REFERENCIAS

- [1] Clark, J. H.; Budarin, V.; Deswarte, F. E. I.; Hardy, J. J. E.; Kerton, F. M.; Hunt, A. J.; Luque, R.; Macquarrie, D. J.; Milkowski, K.; Rodriguez, A.; Samuel, O.; Tavener, S. J.; White, R. J.; Wilson, A. J. Green chemistry and the biorefinery: a partnership for a sustainable future. *Green Chemistry*. **2006**, 8(10), 841-928.
- [2] Wei, L.; Pordesimo, L. O.; Igathinathane, C.; Batchelor, W. D. Process engineering evaluation of Ethanol production from wood through bioprocessing and chemical catalysis. *Biomass and Bioenergy*. **2009**, 33(2), 255-266.
- [3] Aksoy B.; Cullinan H. T.; Sammons Jr. N. E.; Eden M.R. Identification of optimal poultry litter biorefinery location in Alabama through minimization of feedstock transportation cost. *Environmental Progress*. **2008**, 27(4), 515-523.
- [4] Cherubini, F.; Bird, N. D.; Cowie, A.; Jungmeier, G.; Schlamadinger, B.; Woess-Gallasch, S. Energy and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources Conservation and Recycling*. **2009**, 53(8), 434-447.
- [5] Mansoornejad, B.; Chambost, V.; Stuart, P. Integrating Product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Computers and Chemical Engineering*. **2010**, 34(9), 1497-1506.
- [6] Chambost, V.; Mcnutt, J.; Stuart, P. R. Guided Tour: Implementing the forest biorefinery at existing pulp and paper mills. *Pulp and Paper-Canada*. **2008**, 109(7-8), 19-27.
- [7] Sammons, Jr. N. E.; Yuan, W.; Eden, M. R.; Aksoy, B.; Cullinan, H. T. Optimal biorefinery product allocation by combining process and economic modeling. *Chemical Engineering Research and Design*. **2008**, 86(7), 800-808.
- [8] Elms, R. D.; El-Halwagi, M. M. Optimal scheduling and operation of biodiesel plants con multiple feedstokes. *International Journal of Process Systems Engineering*. **2009**, 1(1), 1-28.
- [9] Kokossis, A. C.; Yang, A. On the use of systems technologies and a systematic approach for the synthesis and the design of future biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*. **2010**, 34(9), 1397-1405.



- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Pokoo-Aikins, G.; Heath, A.; Mentzer, R. A.; Mannan, S. M.; Rogers, W. J.; El-Halwagi, M. M. A multi-criteria approach to screening alternatives for converting sewage sludge to biodiesel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **2010**, 23(3), 412-420.
- [15] Sammons, Jr. N.; Eden, R. M.; Yuan, W.; Cullinan, H.; Aksoy, B. A flexible framework for optimal biorefinery Product allocation. *Environmental Progress*, 26(4):349-354.
- [16] Van Dyken, S.; Bakken, B. H.; Skjelbred, H. I. Linear mixed-integer models for biomass supply chains con transport, storage and processing. *Energy*. **2010**, 35(3), 1338-1350.
- [17] Freppaz, D.; Minciardi, R.; Robba, M.; Rovatti, M.; Sacile, R.; Taramasso, A. Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. *Biomass and Bioenergy*. **2004**, 26(1), 15-25.
- [18] Chew, T. L.; Bhatia, S. Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and biomass-based biorefinery. *Bioresource Technology*. **2008**, 99(17), 7911-7922.
- [19] Huang, H. J.; Ramaswamy, S.; Al-Dajani, W.; Tschirner, U.; Cairncross, R. A. Effect of biomass species and plant size on cellulosic Ethanol: A comparative



- process and economic analysis. *Biomass and Bioenergy*. **2009**, 33(2), 234-246.
- [20] Kaparaju, P.; Serrano, M.; Thomsen, A. B.; Kongjan, P.; Angelidaki, I. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*. **2009**, 100(9), 2562-2568.
- [21] Azapagic, A.; Clift, R. The application of life cycle assessment to process optimization. *Computers and Chemical Engineering*. **1999**, 23(10), 1509-1526.
- [22] Hugo, A.; Pistikopoulos, E. N. Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*. **2005**, 13(15), 1471-1491.
- [23] Guillén-Gosálbez, G.; Caballero, J. A.; Jiménez, L. Application of life cycle assessment to the structural optimization of process flowsheets. *Industrial and Engineering and Chemistry Research*. **2008**, 47(3), 777-789.
- [24] Guillén-Gosálbez, G.; Grossmann, I. E. Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE Journal*. **2009** 55(1), 99-121.
- [25] Guillén-Gosálbez, G.; Grossmann I. E. A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model. *Computers and Chemical Engineering*. **2010**, 34(1), 42-58.
- [26] Tan, R. R.; Ballacillo, J. B.; Aviso, K. B.; Culaba, A. B. A fuzzy multiple-objective approach to the optimization of bioenergy system footprints. *Chemical Engineering Research and Design*. **2009**, 87(9), 1162-1170.
- [27] Urban, R. A.; Bakshi, B.; Grubb, G. F.; Baral, A.; Mitsch, W. J. Towards sustainability of engineered processes: Designing self-reliant networks of technological-ecological systems. To appear in *Computers and Chemical Engineering*. **2010**, DOI: 10.1016/j.compchemeng.2010.02.026.
- [28] Ojeda, K. A.; Sánchez, E. L.; Suárez, J.; Avila, O.; Quintero, V.; El-Halwagi, M.; Kafarov, V. Application of computer-aided process engineering and energy analysis to evaluate different routes of biofuels production from lignocellulosic



- Biomass. To appear in *Industrial Engineering and Chemistry Research*. **2010**, DOI: 10.1021/ie100633g.
- [29] Geodkoop, M.; Spriensma, R. The eco-indicator 99, A damage oriented for life cycle impact assessment. Methodology report and manual for designers; Technical report, PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands. **2001**.
- [30] Diwekar, U. M. Introduction to applied optimization and modeling. Kluwer Academic Press, The Netherlands. **2003**.
- [31] Horta-Nogueira, L. A. Task 5: Ethanol and ETBE production and end-use in Mexico. *Potential and Feasibility of the use of bioethanol and biodiesel for transport in Mexico SENER-IDB-GTZ*. **2006**.
- [32] Trindade, S. C. Task 7: Rationales, drivers and barriers for fuel Ethanol and ETBE market introduction. *Potential and Feasibility of the use of bioethanol and biodiesel for transport in Mexico SENER-IDB-GTZ*. **2006**.
- [33] Lazcano-Martínez, I. Task B: Agricultural aspects and sources for biodiesel production. *Potential and Feasibility of the use of bioethanol and biodiesel for transport in Mexico SENER-IDB-GTZ*. **2006**.
- [34] Müller-Langer, F.; Probst, O.; Thrän, D.; Weber, M. Task C: Biodiesel production and end-use in Mexico: current and future (Scenario Building). *Potential and Feasibility of the use of bioethanol and biodiesel for transport in Mexico SENER-IDB-GTZ*. **2006**.
- [35] SAGARPA-SIAP. (2010). Almanac for the sowing 2008-2009. SENER, Bioenergetics production program.
http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350
- [36] SEMARNAT. (2006). Forest almanac 2006.
<http://www.semarnat.gob.mx/tramites/gestionambiental/forestalsuelos/Anuarios/Anuario%20Forestal%202006.pdf>;
http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008e_bioenergia.pdf
- [37] Guinée, J. B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppés, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; Van Duin, R.; Huijbregts, M. A. J. Handbook on life cycle assessment.



-
- Operational guide to the ISO standards, Kluwer Academic Publishers:
Dordrecht, The Netherlands. **2002**.
- [38] Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeruas, A.; Raman, R. *GAMS-Language guide*.
Washington, D.C.: GAMS Development Corporation. **2006**.



APÉNDICE A. - CÓDIGO GAMS DEL PROBLEMA

\$TITLE PLANING BIOREFINERY

SETS

M	BIORESOURCES	/1*21/
*1.-	WOOD CHIPS	
*2.-	WHEAT STRAW	
*3.-	PALM OIL SHELL	
*4.-	RICE STRAW	
*5.-	SAWDUST	
*6.-	COMERCIAL WOOD	
*7.-	SUGAR CANE	
*8.-	WHEAT	
*9.-	GRAIN CORN	
*10.-	GRAIN SORGHUM	
*11.-	CASSAVA ROOT	
*12.-	SUGAR BEET	
*13.-	SWEET SORGHUM	
*14.-	SOY	
*15.-	AFRICAN PALM OIL	
*16.-	SUNFLOWER	
*17.-	CASTOR	
*18.-	COTTON	
*19.-	RAPESEED	
*20.-	JATROPHA	
*21.-	SAWFLOWER	

K	PRODUCTS	/1*3/
*1.-	ETHANOL	
*2.-	HYDROGEN	
*3.-	BIODIESEL	

B	BY-PRODUCTS	/1*8/
*1.-	GRAIN DISTILLERY	
*2.-	CARBON DIOXIDE	
*3.-	ACETIC ACID	
*4.-	DRY PULP	
*5.-	GREEN FOLIAGE	



- *6.- PALM OIL
- *7.- CATTLE CAKE
- *8.- BIOHYDROGEN

R ROUTES /1*10/;

- *1.- PRETREATMENT ACID HYDROLYSIS AND FERMENTATION
- *2.- PRETREATMENT GASIFICATION AND BIOSYNTESIS
- *3.- PRETREATMENT GASIFICATION AND CHEMICAL SYNTESIS
- *4.- HYDROLYSIS AN FERMENTATION WITH BLACK FERMENTATION FOR HYDROGEN
- *5.- CATALITIC PIROLYSIS WITH LA/AL2O3
- *6.- CATALITIC PIROLYSIS WITH GAMMA/AL2O3
- *7.- CATALITIC PIROLYSIS WITH CR2O3
- *8.- CATALITIC PIROLYSIS WITH NICKEL
- *9.- CATALITIC PIROLYSIS WITH CU-MCM-41
- *10.- PRETREATMENT EXTRACTION AND TRANSESTERIFICATION WITH ETHANOL

PARAMETERS

ALFA (K, M, R) CONVERSION FACTORS TO PRODUCT K FROM M BY R

*THE FACTORS ARE IN MASS RATIO

/

- 1.1.1 0.1669
- 1.1.2 0.2625
- 1.1.3 0.1887
- 1.2.1 0.2723
- 1.2.4 0.1314
- 2.3.5 2.6000
- 2.3.6 2.6200
- 2.4.7 22.8700
- 2.5.7 25.7000
- 2.5.8 5.3000
- 2.6.9 0.8700
- 1.7.1 0.0592
- 1.8.1 0.2857
- 1.9.1 0.3149
- 1.10.1 0.2999
- 1.11.1 0.2999
- 1.12.1 0.0868
- 1.13.1 0.0553



**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**



3.14.10 0.1763
 3.15.10 0.2064
 3.16.10 0.2950
 3.17.10 0.3543
 3.18.10 0.1668
 3.19.10 0.3595
 3.20.10 0.3268
 3.21.10 0.2850/

	BETHA (K, M, R, B)	CONVERSION FACTORS TO BYPRODUCT
/		
1.9.1.1	0.333	
1.9.1.2	0.285	
1.8.1.1	0.430	
1.8.1.2	0.256	
1.2.1.3	0.0315	
1.12.1.4	0.0125	
1.10.1.1	0.333	
1.10.1.2	0.285	
1.11.1.5	1.5	
3.15.10.6	0.031	
3.20.10.7	0.651	
3.14.10.7	0.800	
3.19.10.7	0.500	
3.21.10.7	0.728	
3.16.10.7	0.613	
1.7.1.2	0.0607	
1.2.4.8	0.0022	
1.2.4.2	0.1400	
/		

*THE COSTS ARE IN USD PER TON

	COSTP (K)	PRODUCTS COST
/1	696.82	
2	2470	
3	841	
/		



**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**



*THE COSTS ARE BASED AT THE END OF 2008 (SAGARPA)

	COSTM (M)	BIORESOURCES COST
/1	86.60	
2	38.85	
3	367.8899	

*THE PREVIOUS COST IS BASED AT THE END OF 2005

4	100
5	0
6	60.62
7	28.98
8	286.10
9	207.40
10	167.77
11	230.71
12	150.29
13	31.11
14	330.58
15	66.31
16	12.66
17	533.84
18	361.89
19	227.08
20	110.40

*THE PREVIOUS COST IS BASED AT THE END OF 2005

21	269.07
/	

	COSTBY (B, M)	COST BY-PRODUCT B FROM M
/		
1.8	140.06	
1.9	140.06	
1.10	140.06	
4.12	112.04	
5.11	9.80	
6.15	634.92	
7.20	72.92	
7.14	201.21	
7.19	93.37	



**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**



7.21 40.43
7.16 60.97
8.1 2470
/

*THE COSTS ARE IN USD PER TON PROCESSED

	PROCESSINGCOST (K,M,R)	PROCESSIING COST TO PRODUCT K FROM M
BY R		

/

1.2.1 38.29
1.7.1 30.40
1.8.1 50.68
1.9.1 55.86
1.10.1 53.20
1.11.1 88.20
1.12.1 27.50
1.13.1 16.10
3.14.10 47.02
3.15.10 55.05
3.16.10 78.67
3.17.10 94.50
3.18.10 44.50
3.19.10 95.87
3.20.10 87.16
3.21.10 76.01
/

*THE PRODUCTION IS IN TON PER YEAR AND IT IS FOR MEXICO AT THE END OF 2008

	M MAX (M)	MAXIMUM AVAILABLE RESOURCES
/1	190600.57	
2	52559.77	
3	0	
4	0	
5	13672.93	
6	69005.34	
7	51090720.79	
8	1902794.67	
9	1573914.77	



**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**



10	6593050.48
11	13639.50
12	167.00
13	5032396.62
14	153022.20
15	307756.87
16	111208.00
17	8.50
18	365226.98
19	503.86
20	529.80
21	95831.27/

*THE DEMANDS WERE ESTIMATING SIZE IN TON PER YEAR FOR MEXICO IN 2010

 PMAX (K) MAXIMUM DEMAND

/1 3616888.32

*THIS AMOUNT IS CONSIDERING THE THIRD SCENARY

*10% ETHANOL IN GASOLINE

2 375482918.3

*375482918.3

*20% DEMAND NATURAL GAS

3 814000

*3255000

*THIS AMOUNT IS CONSIDERING THE THIRD SCENARY

*5% BIODIESEL IN CONVENTIONAL DIESEL

/

 PROCPMAX (R) MAXIMUM PROCESSING

/1 +INF

2 +INF

3 +INF

4 +INF

5 +INF

6 +INF

7 +INF

8 +INF

9 +INF

10 +INF/



	EIM (M)	ECOINDICATOR FOR BIORESOURCE M
/1	211.12	
2	146.09	
3	0.00	
4	0.00	
5	211.12	
6	169.32	
7	12.14	
8	146.09	
9	199.78	
10	250.56	
11	62.47	
12	48.33	
13	41.84	
14	444.06	
15	14.61	
16	2.04	
17	631.69	
18	245.08	
19	404.00	
20	14.61	
21	614.38/	

	EIK (K)	ECOINDICATOR FOR PRODUCT K
/1	32.13	
2	0.00	
3	10.15	
/		

	EIR (K, M, R)	ECOINDICATOR FOR PROCESSING R
/		
1.7.1	1.84	
1.9.1	17.16	
1.8.1	13.10	
1.2.1	11.84	
1.11.1	42.05	
1.12.1	2.75	



1.13.1	5.85
1.10.1	5.85
1.1.1	39.31
1.1.2	9.90
1.1.3	10.39
1.2.4	0.70
3.14.10	9.02
3.15.10	10.56
3.16.10	15.09
3.17.10	18.13
3.18.10	8.54
3.19.10	18.39
3.20.10	16.72
3.21.10	14.58/

POSITIVE VARIABLES

P(K, M, R)	PRODUCT K FROM M THROUGH R,
F(K, M, R)	RESOURCE TO K FROM M THROUGH R;

VARIABLES

PROFIT	NET ANNUAL GAIN,
EI	ENVIRONMENTAL IMPACT,
DMPR	ALLOWABLE PRINCIPAL MATERIAL;

SCALARS

CONTADOR	CONT,
CONTADOR2	CONT2,
MAXEI	MAXIMUM ENVIRONMENTAL IMPACT;

CONTADOR2=0;

EQUATIONS

MBP(K, M, R)	MATERIAL BALANCES FOR PRODUCTS,
LDISP(M)	ALLOWABLE MATERIALS,
LDISP2(M)	ALLOWABLE PRINCIPAL MATERIALS,
LDEM(K)	MAXIMUM DEMAND,
LPROC(R)	PROCESSING LIMIT,



**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**



TEMP TEMPORAL,
ALLOW FRACCION DE DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA PRINCIPAL,
OBJ1 OBJECTIVE FUNTION,
OBJ2 ENVIRONMENT IMPACT;

*EQUATIONS FOR THE MODEL

```

MBP ( K , M , R ) . .                    P ( K , M , R ) = E = ALFA ( K , M , R ) * F ( K , M , R ) ;
LDISP ( M ) . .                         SUM ( ( K , R ) , F ( K , M , R ) ) = L = MMAX ( M ) ;
LDISP2 ( M ) $ ( ORD ( M ) = 7 ) . .    SUM ( ( K , R ) , F ( K , M , R ) ) = L = MMAX ( M ) * ( 1 - CONTADOR2 ) ;
LDEM ( K ) . .                         SUM ( ( M , R ) , P ( K , M , R ) ) = L = PMAX ( K ) ;
LPROC ( R ) . .                         SUM ( ( K , M ) , P ( K , M , R ) ) = L = PROC PMAX ( R ) ;
TEMP . .                                 EI = L = CONTADOR * MAXEI ;
ALLOW . .                                DMPR = E = 1 - CONTADOR2 ;
OBJ1 . .                                 PROFIT = E = SUM ( ( K , M , R ) , P ( K , M , R ) * COSTP ( K ) )
                                          + SUM ( ( K , M , R , B ) , BETHA ( K , M , R , B ) * F ( K , M , R ) * COSTBY ( B , M ) )
                                          - SUM ( ( K , M , R ) , F ( K , M , R ) * COSTM ( M ) )
                                          -
SUM ( ( K , M , R ) , P ( K , M , R ) * PROCESSINGCOST ( K , M , R ) ) ;
OBJ2 . .                                 EI = E = SUM ( ( K , M , R ) , F ( K , M , R ) * EIM ( M ) ) +
SUM ( ( K , M , R ) , P ( K , M , R ) * EIK ( K ) ) + SUM ( ( K , M , R ) , F ( K , M , R ) * EIR ( K , M , R ) ) ;

MODEL BIOREFINARYINITIAL /MBP, LDISP, LDISP2, LDEM, LPROC, ALLOW, OBJ1, OBJ2/;
MODEL BIOREFINARY /ALL/;
WHILE ( (CONTADOR2 LE 1),
          SOLVE BIOREFINARYINITIAL USING LP MAXIMIZING PROFIT;
          MAXEI=EI.L;
          CONTADOR=0;
          WHILE ( (CONTADOR LE 1),
                  SOLVE BIOREFINARY USING LP MAXIMIZING PROFIT;
                  CONTADOR=CONTADOR+1E-1;
                  );
          CONTADOR2=CONTADOR2+2E-1;
);

```



APÉNDICE B.- EJEMPLO DE USO DEL ECO-INDICADOR

Se examina el ejemplo de una máquina de café, el cual se desarrolla en base a los pasos definidos para el manejo del *Eco-Indicador* 99.

Análisis simple de una máquina de café

Una firma de diseño, está diseñando un nuevo modelo de una máquina de café para uso domestico y quiere considerar aspectos ambientales. Para tomar esto a consideración hay que realizar un análisis entre el modelo actual y el que se quiere diseñar.

Paso 1: Definición del propósito del cálculo de los Eco-Indicadores.

Primero se debe establecer el propósito del cálculo del *Eco-Indicador*, en otras palabras: ¿Dónde puede comenzar el diseñador a tomar en cuenta de la mejor manera el aspecto ambiental? El propósito no es que se comparen dos máquinas de café. En primera instancia es posible hacer bastantes cálculos sencillos considerando simplificaciones son permisibles.

Paso 2: Definición del ciclo de vida.

El diagrama del proceso se muestra en **Figura 19**. Las cantidades listadas en el siguiente paso están también en el diagrama del proceso. Se usa un modelo simplificado de una máquina de café, en el cual solo se usa poliestireno para la cubierta, la jarra es de vidrio, el plato de acero fundido y un tubo vertical de aluminio. En este caso se omiten el cable principal y el enchufe. Toda la figura está dividida para el cálculo del *Eco-Indicador*. El consumo de agua y café es omitido porque difícilmente los diseñadores saben esto. La presentación tiene que ser omitida porque no se toma en cuenta en este nivel de detalle.

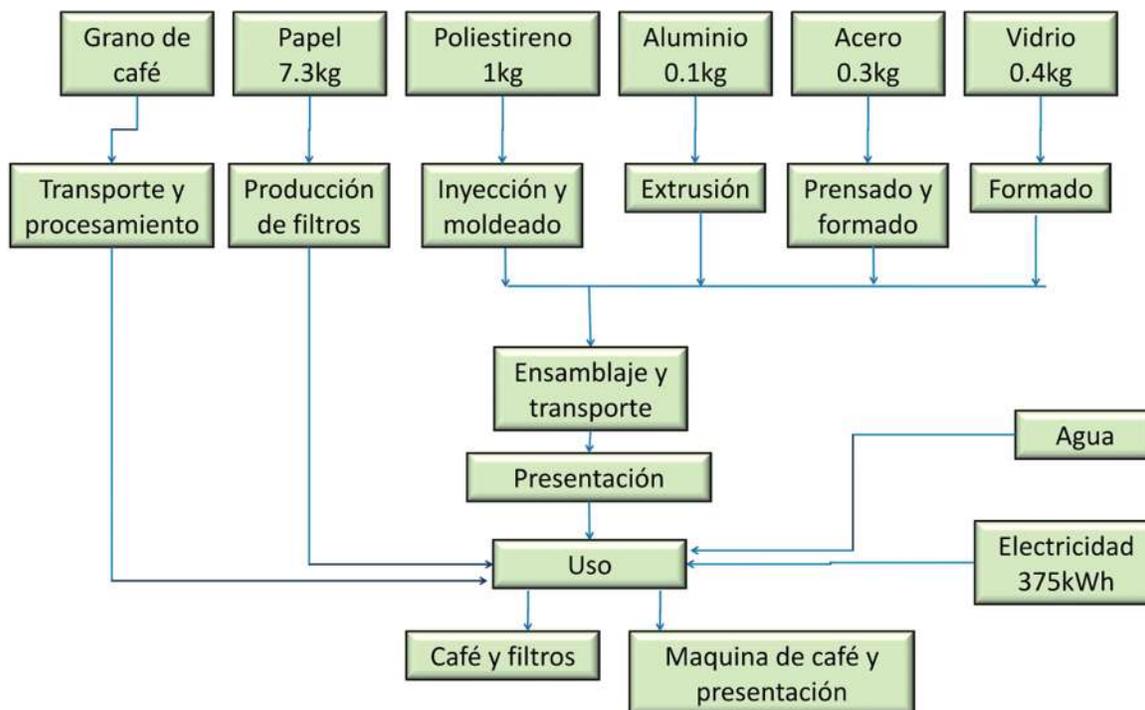


Figura 19. Diagrama de proceso de un modelo simplificado de máquina de café, con cantidades y suposiciones.

Paso 3: Cuantificación de los materiales y procesos.

Las cantidades de material y procesamiento; pueden conocerse o medirse. Las cantidades de materiales usados pueden obtenerse a partir de especificaciones de diseño o, si la máquina existe, por pesado de los componentes. Se necesita una estimación de la frecuencia de uso para la cantidad de electricidad requerida y el número de filtros. En este ejemplo se asume que la máquina es usada dos veces al día durante 5 años a media capacidad (5 tazas). Además se supone que el café debe permanecer caliente por media hora después de encendido. Con esto se puede calcular fácilmente que se necesitan 3650 filtros con un peso total de 7.3kg. El consumo de electricidad es un poco más difícil de determinar pero como una primera aproximación se obtiene al multiplicar el tiempo que permanece en uso, por la potencia. El consumo de energía para mantener el café caliente es difícil de medir, pero puede obtenerse a través de simples mediciones. Otras suposiciones pueden realizarse en torno al consumidor, en la etapa de disposición. No es lógico pensar



que en este caso la máquina se desmantelará y se dispondrá de sus desechos por separado. Por tanto, la máquina será tratada como desecho municipal. En este escenario se considera que se tiene certeza sobre la proporción de vidrio que se tira y el que se recicla, por esta razón no es necesario incluir el vidrio que es separado para reciclaje en el cálculo. En cuanto a los filtros normalmente se desechan con el desperdicio orgánico.

Paso 4: Vaciado de datos.

Los datos ahora pueden ser vaciados para cada fase en el ciclo de vida y lo relevante es llenar los valores de **Eco-Indicador**. Se tiene que tener cuidado con las unidades. El puntaje entonces es calculado para cada proceso y se obtiene un resultado.

Cuando se consulta la lista con los valores de **Eco-Indicador**, en ocasiones se observa que no todos los procesos requieren ser incluidos. Se asumirá que los valores que no se encuentren tienen que ser calculados. Este ejemplo involucra un número de procesos de tratamiento y desperdicios. Las siguientes suposiciones son necesarias.

El indicador es muy bajo para el uso del acero, es por ellos que el procesamiento del metal puede ser omitido.

No se tienen datos para la obtención de vidrio. Sin embargo, se estima una cantidad de energía (En este caso 4MJ) basado en punto de fusión, el calor específico y la eficiencia del horno.

La fase de disposición no contiene valor de indicador para desperdicio que pueda ser usado para composta. Por tanto existen dos opciones posibles: la primera en que se ignora la posibilidad de hacer composta y se asume que todo el papel termina en el sistema de procesamiento de desperdicio municipal, y la segunda, en la cual se asume que el compostaje tiene un impacto insignificante y puede ser omitido. En este ejemplo se supone que todo el papel termina en el sistema de tratamiento municipal.



Tabla 13. Indicadores para la producción (Materiales, tratamientos y energía extra) en el ejemplo del apéndice B.

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Poliestireno	1kg	360	360
Inyección y moldeado	1kg	21	21
Aluminio	0.1kg	780	78
Extrusión Al	0.1kg	72	7
Acero	0.3kg	86	26
Vidrio	0.4kg	58	23
Gas de combustión	4MJ	5.3	21
Total (mPt)			536

Tabla 14. Indicadores para el uso (Transporte, energía y posibles materiales auxiliares) en el ejemplo del apéndice B.

Proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Electricidad bajo voltaje	375kWh	37	13875
Papel	7.3kg	96	701
Total (mPt)			14576

Tabla 15. Indicadores para la disposición (Proceso de disposición para cada tipo de material) en el ejemplo del apéndice B.

Material y tipo de procesamiento	Cantidad	Indicador	Resultado
Desecho municipal PS	1kg	2	2
Desecho municipal Hierro	0.4kg	-5.9	-2.4
Desecho domestico, vidrio	0.4kg	-6.9	-2.8
Desecho municipal papel	7.3kg	0.71	5.2
Total (mPt)			2
Total (mPt) (Todas las fases)			15114



Paso 5: Interpretación de resultados.

Los resultados en la forma revelan que la etapa de uso tiene el mayor impacto. Por tanto el diseño del equipo debe enfocarse a que consuma menor energía y se reduzca el consumo de papel con la reutilización de filtros. Entre los materiales el poliestireno tiene un mayor impacto.



APÉNDICE C. EJEMPLO DEL MÉTODO SIMPLEX

Resolver mediante el método simplex el siguiente problema:

$$\text{Maximizar } Z = f(x,y) = 3x + 2y$$

$$\text{sujeto a: } 2x + y \leq 18$$

$$2x + 3y \leq 42$$

$$3x + y \leq 24$$

$$x \geq 0, y \geq 0$$

Paso 1: Convertir las desigualdades en igualdades.

Se introduce una *variable de holgura* por cada una de las restricciones de desigualdad, para convertirlas en igualdades, resultando el sistema de ecuaciones lineales:

$$2x + y + r = 18$$

$$2x + 3y + s = 42$$

$$3x + y + t = 24$$

Paso 2: Igualar la función objetivo a cero.

$$-3x - 2y + Z = 0$$

Paso 3: Escribir la tabla inicial Simplex.

En las columnas aparecen todas las variables básicas del problema y las variables de holgura. En las filas se observan, para cada restricción las variables de holgura con sus coeficientes de las igualdades obtenidas, y la última fila tiene los valores resultantes de sustituir el valor de cada variable en la función objetivo.



Tabla Iteración 1						
Base	x	y	r	s	t	Resultado
r	2	1	1	0	0	18
s	2	3	0	1	0	42
t	3	1	0	0	1	24
Z	-3	-2	0	0	0	0

Paso 4: Encontrar la variable decisión que entra a la base y la variable de holgura que sale de la base.

Para escoger la variable de decisión que entra en la base, nos fijamos en la última fila, la de los coeficientes de la función objetivo y escogemos la variable con el coeficiente negativo mayor (en valor absoluto).

Si existiesen dos o más coeficientes iguales que cumplan la condición anterior, entonces se elige uno cualquiera de ellos.

Si en la última fila no existe ningún coeficiente negativo, significa que se ha alcanzado la solución óptima. Por tanto, lo que va a determinar el final del proceso de aplicación del método del simplex, es que en la última fila no haya elementos negativos.

Para encontrar la variable de holgura que tiene que salir de la base, se divide cada término de la última columna (valores solución) por el término correspondiente de la columna pivote, siempre que estos últimos sean mayores que cero.

Si hubiese algún elemento menor o igual que cero no se hace dicho cociente. En el caso de que todos los elementos fuesen menores o iguales a cero, entonces tendríamos una solución no acotada y no se puede seguir.

El término de la columna pivote que en la división anterior de lugar al menor cociente positivo, indica la fila de la variable de holgura que sale de la base. Esta fila se llama *fila pivote*.

Si al calcular los cocientes, dos o más son iguales, indica que cualquiera de las variables correspondientes puede salir de la base.



En la intersección de la fila pivote y columna pivote tenemos el elemento pivote operacional.

Tabla para paso 4							
Base	x	y	r	s	t	Resultado	
r	2	1	1	0	0	18	9
s	2	3	0	1	0	42	21
t	3	1	0	0	1	24	8
Z	-3	-2	0	0	0	0	0

Paso 5: Encontrar los coeficientes de la nueva tabla

Los nuevos coeficientes de *la variable que entra a la base* se obtienen dividiendo todos los coeficientes de la fila *de la variable que sale* por el pivote operacional, que es el que hay que convertir en 1.

A continuación mediante la reducción Gaussiana hacemos ceros los restantes términos de su columna, con lo que obtenemos los nuevos coeficientes de las otras filas incluyendo los de la función objetivo.

Si en lugar de maximizar se trata de un problema de minimizar se sigue el mismo proceso, pero cambiando el sentido del criterio, es decir, para entrar en la base se elige la variable cuyo valor, en la fila de la función objetivo, sea el mayor de los positivos y se finalizan las iteraciones cuando todos los coeficientes de la fila de la función objetivo son negativos.

Tabla Iteración 2							
Base	x	y	r	s	t	Resultado	
r	0	1/3	1	0	-2/3	2	
s	0	7/3	0	1	-2/3	26	
x	1	1/3	0	0	1/3	8	
Z	0	-1	0	0	1	24	

Como en la última fila sigue un número negativo (-1) Se repite el proceso a partir del paso 4



Paso 4: Encontrar la variable decisión que entra a la base y la variable de holgura que sale de la base.

Tabla paso 4 Iteración 2							
Base	x	y	r	s	t	Resultado	
r	0	1/3	1	0	-2/3	2	6
s	0	7/3	0	1	-2/3	26	78/7
x	1	1/3	0	0	1/3	8	24
Z	0	-1	0	0	1	24	-24

Paso 5: Encontrar los coeficientes de la nueva tabla.

Tabla Iteración 3							
Base	x	y	r	s	t	Resultado	
y	0	1	3	0	-2	6	
s	0	0	-7	1	4	12	
x	1	0	-1	0	1	6	
Z	0	0	3	0	-1	30	

Como en la última fila sigue un número negativo (-1) Se repite el proceso a partir del paso 4.

Paso 4: Encontrar la variable decisión que entra a la base y la variable de holgura que sale de la base.

Tabla paso 4 Iteración 3							
Base	x	y	r	s	t	Resultado	
y	0	1	3	0	-2	6	-3
s	0	0	-7	1	4	12	3
x	1	0	-1	0	1	6	6
Z	0	0	3	0	-1	30	-30



Paso 5: Encontrar los coeficientes de la nueva tabla.

Tabla Final						
Base	x	y	r	s	t	Resultado
y	0	1	-2/4	2/4	0	12
t	0	0	-7/4	1/4	1	3
x	1	0	3/4	-1/4	0	3
Z	0	0	5/4	1/4	0	33

Con lo cual se ve que la solución viene dada por el valor de $Z = 33$; en el conjunto de x e y (3,12).