



Universidad Autónoma de Yucatán
Facultad de Ingeniería Química

**UBICACIÓN DE INSTALACIONES PARA LA
TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA CON FINES
ENERGÉTICOS**

TRABAJO TERMINAL

Presentada por:

DIDIER ALEJANDRO POOT CASTILLO

En opción al grado de:

**Maestro en Ingeniería de Operaciones
Estratégicas**

Director:

DR. RENÉ LÓPEZ FLORES

Mérida, Yucatán, México. Febrero de 2020

Mérida, Yuc. a 06 de febrero de 2020.

Dr. Julio Sacramento Rivero
Jefe de la Unidad de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Química.

Presente.

Por este medio informo a Ud. que el Trabajo Terminal denominado “UBICACIÓN DE INSTALACIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS” elaborada por el C. Didier Alejandro Poot Castillo para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Operaciones Estratégicas, ha sido realizado bajo mi asesoría y dirección, y considero que cumple con las características propias de un trabajo de titulación.

Sin otro particular, quedo a su disposición para cualquier aclaración adicional.

Atentamente

Dr. René López Flores

Mérida, Yuc. a 06 de febrero de 2020.

IQI. Roger Agustín Bargas Interián
Secretario Administrativo

Facultad de Ingeniería Química.
Presente.

Por este medio informo a Ud. que el Trabajo Terminal denominado “UBICACIÓN DE INSTALACIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS” elaborada por el C. Didier Alejandro Poot Castillo para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Operaciones Estratégicas, ha sido revisado y corregido, por lo que considero que cumple con los requisitos necesarios para ser presentado en examen de grado, autorizando su encuadernación.

Sin otro particular, quedo a su disposición para cualquier aclaración adicional.

Atentamente

Dr. René López Flores

Mérida, Yuc. a 06 de febrero de 2020

M. en C. María Dalmira Rodríguez Martín
Director de la Facultad de Ingeniería Química.

Presente.

Por este medio le solicito me sea concedido presentar Examen en opción al grado de Maestro en Ingeniería de Operaciones Estratégicas, habiendo entregado para tal efecto la documentación correspondiente en la Secretaría Administrativa, de acuerdo con el artículo 54 del Reglamento de Inscripciones y Exámenes de la UADY y del Manual de Procedimientos de Titulación de esta Facultad.

Atentamente

Didier Alejandro Poot Castillo)

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El presente trabajo denominado “UBICACIÓN DE INSTALACIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS” elaborado por el C. Didier Alejandro Poot Castillo, ha sido autorizado para ser presentado en Examen en opción al Grado de MAESTRO EN INGENIERÍA DE OPERACIONES ESTRATÉGICAS.

LOS REVISORES

DR. RENÉ LÓPEZ FLORES

DR. FERNANDO MORALES MENDOZA DR. JAVIER ERNESTO VALENCIA MÉNDEZ

EL DIRECTOR

EL AUTOR

DR. RENÉ LÓPEZ FLORES

ING. DIDIER ALEJANDRO POOT CASTILLO

Aunque un trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiere sido aprobado por el Sínodo, sólo su autor es responsable de las doctrinas en él emitidas

Artículo 90 del Reglamento Interior de la
Facultad de Ingeniería Química de la
Universidad Autónoma de Yucatán

Agradecimientos

A mi madre, Martina, por brindarme todo su apoyo en cada etapa de mi vida, por ser una madre excelente. Y por ser mi mayor ejemplo de fortaleza.

A mi abuelo, Juan, por el amor que me ha dado, y por la confianza que siempre ha tenido en mí.

A mi novia, Betsy, por estar siempre a mi lado, por su confianza y su amor incondicional.

A mi familia, por apoyarme en cada etapa de mi formación.

A mi profesor y director de tesis, René Flores, por aclarar cada paso en este trabajo, por todos los conocimientos adquiridos.

Al CONACYT, por brindar el apoyo para la realización de este trabajo.

A Irene, quien me cuida desde el cielo.

A Dios, por todas las oportunidades que me ha dado en la vida.

Dedicatorias

Dedico de manera especial a mi madre, Martina. Ya que ella me forjo como persona y cimentó en mí los valores que me acompañan en cada paso de mi vida. Madre, te dedico este trabajo porque todo lo que soy, lo soy gracias a ti.

A mi novia, Betsy, porque su apoyo ha sido la clave para lograr mis metas. Te doy gracias infinitas por ser mi mano derecha y mi fiel compañera, por estar para mí en cada paso a lo largo de estos años.

A mi familia, porque este logro, también es de ustedes. Los amo.

CONTENIDO

Resumen	iii
Abstract	iv
Capítulo I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	2
Capítulo II. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Marco conceptual	5
2.1.1 Biomasa.....	6
2.1.2 Biocombustible	7
2.1.3 Biorrefinería	11
2.1.4 Problemas de Optimización	12
2.1.5 Optimización multiobjetivo	15
2.1.6 Herramientas de optimización	16
2.1.7 Ubicación de instalaciones	20
2.2 MARCO CONTEXTUAL	21
2.2.1 Principales biomosas de México.....	21
2.2.2 Tecnologías de transformación de biomasa	24
2.2.3 Contexto general de la localización de instalaciones.....	29
2.2.4 Localización de plantas de biocombustible.....	30
Capítulo III. OBJETIVOS.....	32
3.1 Justificación.....	32
3.2 Planteamiento del problema.....	33
3.3 Objetivos	34
3.3.1 Objetivo general.....	34
3.3.2 Objetivos específicos.....	34
Capítulo IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
4.1 Tipo de investigación.....	35
4.2 Enfoque	35
4.3 Diseño	36
4.4 Unidad de análisis	36
4.5 Metodología.....	36
4.6 Metodología propuesta.....	37

4.6.1	Fase I. Investigación documental.	38
4.6.2	Fase II. Análisis de información.	39
4.6.3	Fase III. Modelado.	40
4.6.4	Fase IV. Resultados.	40
Capítulo V. RESULTADOS		42
5.1	Análisis de la información.....	42
5.1.1	Tipos de biomasa del sistema	42
5.1.2	Costos de producción	46
5.1.3	Potencial energético	59
5.2	Modelado	62
5.2.1	Conjuntos de datos.....	62
5.2.2	Variables de decisión.....	62
5.2.3	Parámetros	63
5.2.4	Función objetivo.....	65
5.2.5	Restricciones	65
5.3	Resolución teórica del modelo	67
Capítulo VI. DISCUSIÓN.....		75
6.1	Casos de discusión	75
6.2	Biorrefinerías por tipo de biomasa.....	81
6.3	Generalidades del modelo	83
Capítulo VII.....		CONCLUSIONES
	84	
Capítulo VIII. REFERENCIAS.....		86
Capítulo IX. ANEXOS.....		97
9.1	Anexo I. Costo eléctrico por región.	97
9.2	Anexo II. Costo de agua potable	104
9.3	Anexo III. Concentrado de valores	107

Resumen

La investigación de nuevos combustibles encuentra en el uso de la biomasa una alternativa viable en la generación de bioenergía. A pesar de que se han desarrollado tecnologías para el procesamiento de la biomasa, aun no existen biorrefinerías con una producción industrial en México. En el presente trabajo se plantea un modelo de optimización multiobjetivo que analiza tres tipos de biomasa con la finalidad de identificar los lugares óptimos para establecer biorrefinerías en México. El objetivo del modelo es la reducción de costos, al mismo tiempo que se maximiza el volumen de producción, lo cual representa una actividad innovadora ya que no están reportados estudios de optimización multiobjetivo para ubicación de biorrefinerías en México que contemplen diferentes tipos de biomasa.

Entre las variables principales destacan los costos asociados a la producción, costos de tecnología, costo de agua y electricidad, así como los niveles de materia prima disponible y tasas de aprovechamiento. Se incluyen los costos de transporte de materia prima, sin embargo, los costos asociados a la distribución de biocombustible no son estudiados debido al alcance del presente trabajo. Se encontró que el uso de aceite de cocina usado no es una opción viable para la producción industrial, a pesar de tener costos operativos bajos. Los residuos forestales representan una opción viable para la producción en Chihuahua Jalisco y Oaxaca, mientras la caña de azúcar destaca en San Luis Potosí y Veracruz.

Palabras clave

Biocombustible, biomasa, biorrefinería, optimización multiobjetivo.

Abstract

New fuel researches identify in the use of biomass a viable alternative for the bioenergy generation. Although diverse biomass technologies have been developed for its processing, there are not biorefineries yet with industrial production in México. In the current work, it was designed a multi objective optimization mathematical model analyzing three biomass types in order to obtain/get the optimal location for biorefineries in the country. The objective of the model is to reduce the cost while maximizing the volume of production at the same time. This model represents an innovative contribution because does not exist multi objective optimization studies that consider different biomass types to locate biorefineries.

The main variables are the production associated cost, technologies cost, water and electricity cost, raw material availability, utilization rate. The raw material logistical cost was included; however, the costs associated with the biofuel distribution were not included. This study finds the used cooking oil infeasibility to fuel raw material. This study found the used cooking oil infeasibility to produce biofuels on an industrial scale spite of having operative low costs. Forest waste is an affordable option to biofuel production in Chihuahua Jalisco and Oaxaca; on the other hand, sugarcane highlights in San Luis Potosí and Veracruz

(WCO)

Biofuel, biomass, biorefinery, multi-objective optimization.

Capítulo I. INTRODUCCIÓN

La atmosfera se ha visto dañada debido al impacto que ha generado la producción y consumo de energía a nivel mundial. En el 2015 las emisiones de CO₂ fueron causadas por el petróleo (34%), carbón (45%) y gas natural (20%)

El uso de la energía se ha vuelto algo imprescindible para la sociedad, usada principalmente como combustibles o electricidad. Sin embargo, su fuente principal es de origen fósil. La energía de origen fósil tiene un impacto ambiental que suscita una preocupación mundial, por lo tanto, diversos gobiernos están impulsando el uso de biocombustibles (Duarte, 2015).

México por su parte ha iniciado la búsqueda de nuevos combustibles a partir de la reforma energética del 2013. La investigación se ha centrado en el uso de la biomasa como fuente de energía, ya que es un recurso renovable y su combustión directa es un proceso libre de carbono (International Energy Agency, 2007).

Para reducir los costos de producción en el uso de la biomasa como fuente de energía, la industria requiere de investigaciones relacionadas con la optimización de procesos. Este trabajo tiene como finalidad conocer los lugares dentro del territorio mexicano en los que es viable la instalación de biorrefinerías, considerando como principales puntos la reducción de costos y maximizar el potencial energético a producir.

Para lograr el objetivo planteado se utilizaron tres tipos de biomasa: residuos forestales, caña de azúcar y aceite de cocina usado. Siendo los dos primeros biomasa con una alta producción en México y el tercero biomasa con alto impacto al medio ambiente. Se realizó una investigación de la disponibilidad de biomasa, costos, y tecnologías de transformación; información de utilidad para desarrollar un modelo matemático.

El uso de la optimización multiobjetivo es de gran utilidad en este campo de biocombustibles ya que existen diversos objetivos a cumplir que posiblemente se encuentren en conflicto. En el presente trabajo se diseña un modelo matemático de

optimización multiobjetivo que cuenta con dos funciones objetivo. Para la solución, el modelo se implementa en el software AMPL.

Existe gran variedad de biomasa en México y en el mundo, la metodología propuesta puede ser aplicada para investigaciones futuras ya que la localización estratégica de biorrefinerías proporcionará un avance significativo para la industria. Lograr rendimientos elevados en la producción de biocombustibles se conseguirá al optimizar todas las variables a lo largo de la cadena de suministro. Las biorrefinerías representan una opción prometedora para el uso de la energía y el cuidado del medio ambiente.

El presente trabajo desarrolla una metodología para encontrar ubicaciones óptimas para el establecimiento de biorrefinerías en la república mexicana, cuya importancia se describe en el capítulo I. El capítulo II se desarrolla en temas introductorios importantes para los biocombustibles y las biorrefinerías, brindando un contexto general de la información. Los objetivos se plantean en el capítulo III y la metodología para su resolución se encuentra en el capítulo IV. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo V. La discusión y las conclusiones son abordados en los capítulos VI y VII respectivamente

1.1 Antecedentes

Los combustibles fósiles son la fuente principal de energía en el mundo. En los últimos años el consumo de éstos ha incrementado de tal manera que las emisiones globales de carbono han alcanzado niveles insostenibles y las reservas petróleo han disminuido notoriamente. En 2013 el 82.7% de la generación de energía producida en México provino de combustibles fósiles (SENER, 2015). Los combustibles fósiles dañan la capa de ozono con las emisiones de CO₂ que se generan durante su uso y producción. La energía es esencial para el progreso económico, así como para el logro del desarrollo sostenible. Sin embargo, un requisito previo del desarrollo sostenible es fomentar el crecimiento económico sin

dañar el medio ambiente (Hanif, 2018). El sector energético ha tomado la iniciativa para nuevas fuentes de energía que sean amigables con el medio ambiente.

En México, la Secretaría de Energía es responsable de la política energética nacional, particularmente la planificación del sistema eléctrico mexicano. Actualmente se han implementado proyectos de investigación para desarrollar energías limpias, de las que destacan el uso de la energía eólica y solar. A partir de la reforma energética constituida en 2013 se brinda la posibilidad de incursionar en la generación de combustibles con el fin de llegar a una tasa de producción equiparable a la de consumo. De esta manera se abre la puerta para la producción de combustibles no fósiles. La reforma energética tiene como finalidad la detonación de más y mejores empleos, el crecimiento y desarrollo económico, incrementar la producción de fertilizantes y la inversión extranjera para los recursos a los que no se tiene acceso por la falta de infraestructura (Gobierno de la Republica, 2014).

La reforma energética fomenta la investigación de biomasa como fuente de energía. De acuerdo con (Basu, 2013; Xu et al., 2018). la biomasa es toda materia orgánica que tenga energía almacenada, sea sólida, líquida o gaseosa. La biomasa se encuentra distribuida en todo el país. Pueden ser residuos forestales, de agricultura, urbanos, desechos biológicos, etcétera. A partir de ella y mediante un proceso de transformación, la biomasa puede ser usada como fuente de energía, cuyo impacto al medio ambiente es menor que el de los combustibles fósiles. Se ha denominado biocombustible a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa.

Los biocombustibles representan en la actualidad una fuente potencial de energía renovable, además de que podrían generar nuevos y grandes mercados para los productores agrícolas (Serna, Barrera, & Montiel, 2011). El mundo se encuentra ante una gran campaña para la incorporación temprana de los biocombustibles procedentes de diferentes materias primas, tales como la caña de azúcar, soya, maíz, colza, remolacha entre otros. Sin embargo, el impacto de las materias primas en el sector alimenticio es en algunas veces contraproducente en el ámbito económico, ya que el uso de estos insumos para fines energéticos encarece y disminuye su disponibilidad en el mercado.

El desarrollo de los biocombustibles, genera a su vez la necesidad de crear y localizar nuevas plantas de producción que permitan un desempeño sostenible en términos económicos, ambientales y sociales (Duarte, 2015). El presente trabajo se centra en el diseño y la aplicación de una metodología integral para la toma de decisión en localización de instalaciones para la generación de energía a través de biomasa en la república mexicana. El valor metodológico se sustenta en la integración sistemática de un conjunto de conceptos y procedimientos existentes y otros creados, para dar solución al problema científico, orientados al mejoramiento integral en la toma de decisión sobre localización de plantas de producción de biocombustible. La metodología creada puede ser aplicada no solo en el ámbito mexicano, sino también en otros países.

Para cumplir con el objetivo de la investigación, se propone como base metodológica un análisis de optimización multiobjetivo, el cual tendrá como principal función maximizar el poder energético producido mientras se minimizan los costos de producción. En el primer caso, se relacionará el poder energético producido con el requerido en el proceso de transformación. En el segundo objetivo de optimización se incluyen los costos de materias primas y del proceso tecnológico, sin contar los costos logísticos. Al final del documento se presentarán las conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos.

2.1 Marco conceptual

El presente capítulo proporcionará al lector las definiciones de los principales conceptos establecidos en el documento.

Los combustibles son una fuente de energía que proviene de residuos fósiles, la demanda ha incrementado continuamente, esto provoca un gran impacto ambiental, y acelera el agotamiento de las reservas de petróleo, por lo que se deben encontrar alternativas para generar nuevos combustibles (Archer & Steinberger-Wilckens, 2018).

En la búsqueda de nuevos combustibles, diversos investigadores han encontrado que la energía almacenada en residuos orgánicos puede ser usada para la producción de biocombustibles a escala industrial, tal como se muestra en la Figura 1.

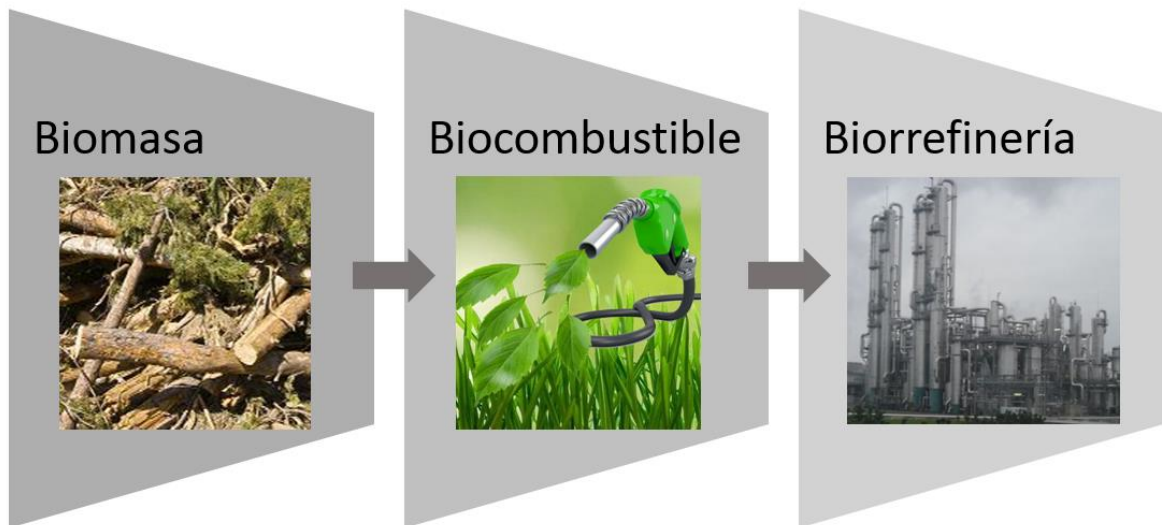


Figura 1. Cadena de bioenergía

2.1.1 Biomasa

La biomasa es materia orgánica que se puede convertir en energía. Ejemplos comunes de biomasa incluyen cultivos alimenticios, cultivos energéticos (por ejemplo, pasto varilla o plantas perennes de pradera), residuos de cultivos (por ejemplo, rastrojo de maíz), desechos y subproductos de madera (residuos de molino y biomasa tradicionalmente no comercial en el bosque) y estiércol animal (Bracmort & Gorte, 2012).

De acuerdo con (Basu, 2013), las fuentes comunes de biomasa son:

- Agrícola: grano alimenticio, bagazo (caña de azúcar triturada), tallos de maíz, paja, cáscaras de semillas, cáscaras de nuez y estiércol de ganado, aves de corral, puercos y otros.
- Bosque: árboles, desechos de madera, madera o corteza, aserrín, tala de árboles y chatarra.
- Municipal: lodo de aguas residuales, combustible derivado de desperdicios, desperdicios de alimentos, papel usado y recortes de jardín.
- Cultivos energéticos: álamos, sauces, alfalfa, tallo azul de pradera, maíz, soja, canola y otros aceites vegetales.
- Biológico: Desechos animales, especies acuáticas y desechos biológicos.

2.1.1.1 Bioenergía

La bioenergía es un tipo de energía renovable que se produce a partir del aprovechamiento de la biomasa mediante algún proceso biológico o mecánico. La energía de la biomasa actualmente aporta aproximadamente el 10% del suministro mundial de energía (Welfle, 2017), dos tercios de esta bioenergía se genera en los países en desarrollo, y el resto en el mundo industrializado.

2.1.2 Biocombustible

Los biocombustibles son todos aquellos combustibles cuya materia prima es la biomasa, incluyen productos químicos enriquecidos en energía a través de procesos biológicos o derivados de conversión química de organismos vivos anteriores (Rodionova et al., 2017). Algunos ejemplos de estos son el biohidrógeno, bioetanol, biobutanol, biometanol, bioaceite, biogás y biodiesel; estos se producen principalmente por procesos químicos, bioquímicos, termoquímicos e hidrotermales.

Los biocombustibles, son el centro de la investigación energética. Sin embargo, existen factores económicos, ambientales, políticos y sociales que intervienen en el desarrollo de esta industria (Trumbo & Tonn, 2016). Un diagrama para la clasificación de biocombustibles se muestra en la Figura 2

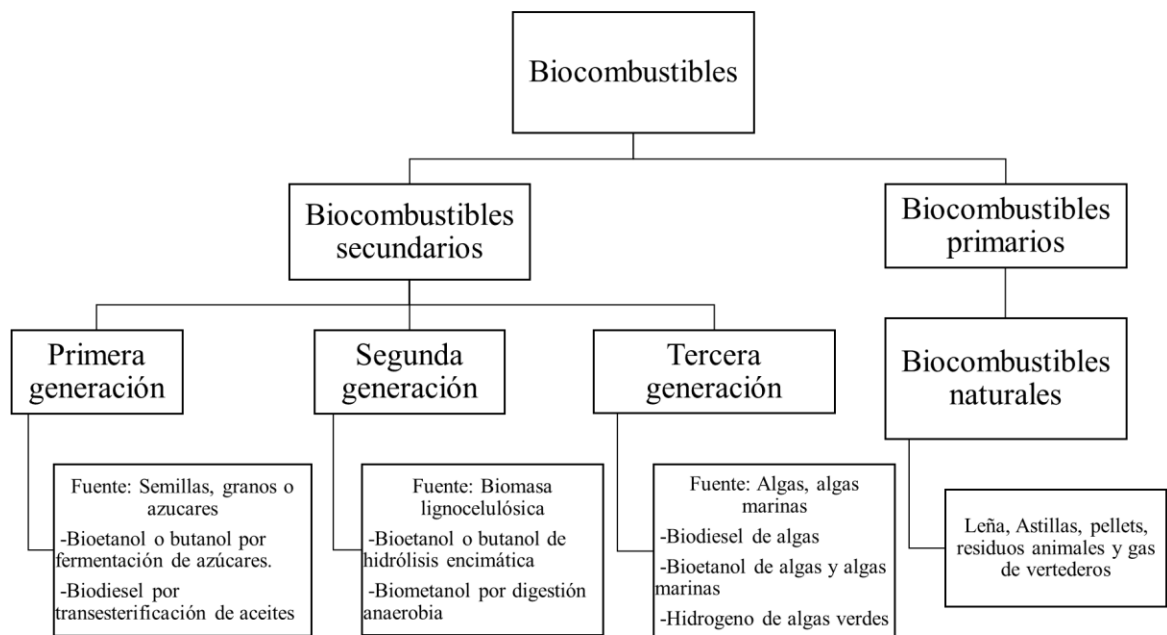


Figura 2. Clasificación de biocombustibles (Bonechi et al., 2017).

2.1.2.1 Biohidrógeno

El hidrógeno es un combustible con gran contenido energético que actúa como alternativa prometedora ante los combustibles fósiles convencionales. El biohidrógeno libera vapor de agua y energía en la combustión, no contribuye a emisiones de gases de efecto invernadero, la lluvia ácida, o al deterioro de la capa de ozono (Bharathiraja, Sudharsanaa, Bharghavi, Jayamuthunagai, & Praveenkumar, 2016).

Los procesos para la producción de biohidrógeno son principalmente a temperaturas y presiones ambientales, y se espera que consuman menos energía que los métodos termoquímicos de producción de hidrógeno (Manish & Banerjee, 2008). Estos procesos pueden usar una variedad de fuentes de carbono como materias primas.

2.1.2.2 Bioetanol

El proceso de producción de bioetanol se basa en propiedades que tienen algunos microorganismos, como *Saccharomyces cerevisiae*, para metabolizar azúcares y producir como desecho alcohol etílico. Para llevar a cabo este en una planta industrial, son necesarias tres etapas principales. La preparación de la materia prima, la fermentación continua y la destilación-rectificación (Rosa, 2016).

Los biocombustibles, incluidos el biodiesel y el bioetanol, ya desempeñan un papel importante en el suministro actual de energía renovable, y se estima que habrá un crecimiento continuo en el uso de estas fuentes de biomasa; de acuerdo, la demanda de bioetanol puede aumentar en un 108% entre 2015 y 2050 (Oliveira, Almeida, Alvim, & Dias, 2017).

2.1.2.3 Biobutanol

El biobutanol es un biocombustible relativamente nuevo. Se puede extraer jugo de los tallos verdes para suministrar azúcares que serán utilizados para su generación (Gomez Flores et al., 2017a). La demanda de butanol junto con la presión del agotamiento del combustible de gasolina han llevado al desarrollo de la producción de biobutanol a partir de biomasa (Ibrahim, Kim, & Abd-aziz, 2018).

El biobutanol tiene un mayor grado de similitud con la gasolina en potencial energético, en comparación con otros biocombustibles (biohidrógeno, bioetanol y biodiesel) ya que cuenta con 29.2MJ (Gomez Flores et al., 2017b) por litro mientras que la gasolina 32.3MJ (Swana, Yang, Behnam, & Thompson, 2011). Además de sus características superiores como combustible en el transporte, también se necesita butanol como sustituto químico para diversas industrias.

2.1.2.4 Biometanol

El biometanol es un líquido incoloro, inflamable y tóxico. Es obtenido de la pirólisis de las maderas y como un coproducto de la producción de carbón (alcohol de maderas). Se considera biometanol, porque está produciendo el combustible a base de alcohol de una fuente biológica (madera) (Minteer, 2011). La ventaja más destacada que presenta es su sencilla fabricación, partiendo del metano, o a través de pirólisis. Como se aprecia en Figura 3 el metano se puede obtener de carbohidratos.

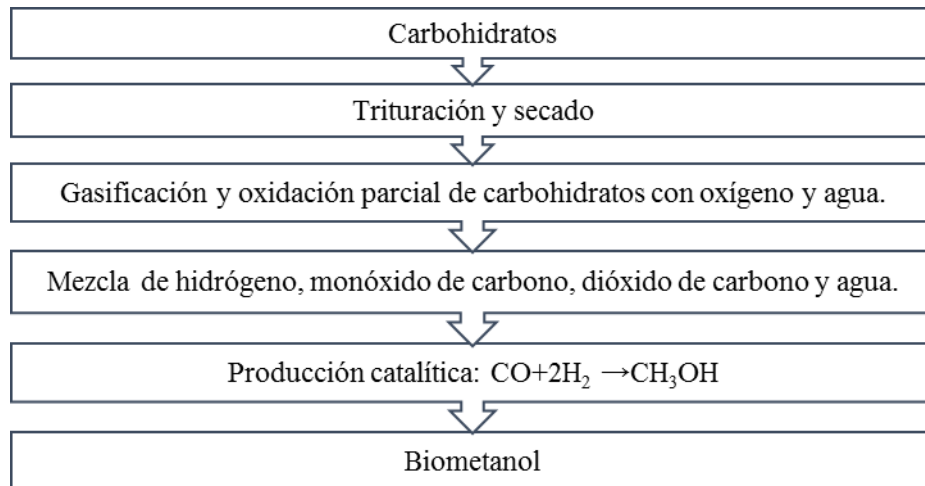


Figura 3. Producción de biometanol mediante carbohidratos de biomasa (Minteer, 2011)

2.1.2.5 Biogás

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico).

Además del viento y la energía solar, el biogás es una fuente de energía muy versátil. Convertido en biometano, puede alimentar directamente a la infraestructura existente de gas natural y así servir como combustible para vehículos o para calefacción de edificios. Se le atribuye al biogás la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el uso eficiente de los desechos y la generación de valiosos fertilizantes (Herbes, Halbherr, & Braun, 2018).

La producción de biogás incluye todos los procesos bioquímicos utilizados para convertir biomasa sólida y líquida en una mezcla de gas combustible (Bonechi et al., 2017). El proceso se lleva a cabo en un digestor anaeróbico en el que la biomasa y los desechos a base de azúcar se convierten en una mezcla de componentes de gas que contienen una alta concentración de metano que puede usarse para la producción de energía eléctrica y térmica.

2.1.2.6 Biodiesel

El biodiesel es un combustible alternativo similar al diésel convencional. Por lo general, se produce a partir de aceite vegetal puro, grasa animal, sebo, aceite vegetal no comestible y aceite de cocina usado (ACU). Su biodegradabilidad, su no toxicidad y su ausencia de azufre y aromáticos lo hacen ventajoso con respecto al diésel de gasolina convencional (Gebremariam & Marchetti, 2018b). Emite menos contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero distintos de los óxidos de nitrógeno, produce menos monóxido de carbono, partículas, humo e hidrocarburos y tiene más oxígeno libre que el diésel convencional (Hasan & Rahman, 2017).

2.1.3 Biorrefinería

Las biorrefinerías son plantas dedicadas a la transformación de diferentes tipos de biomasa en productos biocompuestos o bioenergía. Dado que la biomasa proviene de diversos ambientes y requiere varios procesos de conversión, la biorrefinería es beneficiosa para convertir varias materias primas de biomasa en diversos productos valiosos de forma sostenible con impactos positivos en la actividad económica, el medio ambiente y la sociedad (Demirel, 2018).

A las biorrefinerías se les refiere como de primera o segunda generación, dependiendo de la materia prima usada. Las de primera generación son aquellas que usan los residuos de cultivos alimenticios como maíz y aceite vegetal (Palmeros Parada, Osseweijer, & Posada Duque, 2017), por otro lado las biorrefinerías de segunda generación procesan materia prima ajena al sector alimenticio como los residuos agrícolas, maderas o cultivos energéticos. En el caso de las biorrefinerías cuya biomasa proviene de algas se les denomina biorrefinerías de tercera generación. El desarrollo de biorrefinerías se logrará utilizando de manera adecuada los recursos, y de manera paralela optimizando los procesos a lo largo de la cadena de producción.

2.1.4 Problemas de Optimización

La optimización es un método para determinar los valores de las variables que intervienen en un proceso o sistema para que el resultado sea el mejor posible. A continuación, un ejemplo es presentado para el análisis detallado de la metodología.

Considere el problema de elegir alimentos preparados para cumplir con ciertos requisitos nutricionales. *Optimización de costo de una dieta*, tomado de (Fourer, Gay, & Kenirghan, 2003). En la dieta deben existir al menos 2 paquetes de cada alimento y 10 como máximo. Supongamos que los alimentos se encuentran disponibles en los precios que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Precios de alimentos por paquete

Alimento	Precio
Carne de Res	\$3.19
Pollo	\$2.59
Pescado	\$2.29
Jamón	\$2.89
Macarrones con queso	\$1.89
Pastel de carne	\$1.99
Espagueti	\$1.99
Pavo	\$2.49

Estos alimentos proporcionan por paquete los porcentajes mostrados en la Tabla 2, de los requisitos diarios mínimos de vitaminas A, C, B1 y B2:

Tabla 2. Porcentaje de vitaminas por paquete de alimento

Alimento	A	C	B1	B2
Carne de Res	60	20	10	15
Pollo	8	0	20	20
Pescado	8	10	15	10
Jamón	40	40	35	10
Macarrones con queso	15	35	15	15
Pastel de carne	70	30	15	15
Espagueti	25	50	25	15
Pavo	60	20	15	10

El problema es encontrar la combinación más económica de paquetes que cumplan con los requisitos de una semana, es decir, al menos el 700% de cada nutriente (100% al día). Sin embargo, como consideración de la dieta, los valores no deberán superar 2000%. Se propone crear ocho variables, una por cada alimento, que representen la cantidad de paquetes a adquirir. CRE (carne de res), POL (pollo), PES (pescado), JAM (jamón), MCQ (macarrones con queso), PDC (pastel de carne), ESP (espagueti), PAV (pavo).

Para el desarrollo del problema, es necesario establecer la función objetivo (FO), y las restricciones del modelo. La FO está conformada según la finalidad del problema, en el presente ejemplo, será minimizar el costo de la lista de alimentos a comprar, por lo que se desarrolla la función objetivo (1) que proporcione el costo total de los alimentos adquiridos.

$$\text{Costo Total} = 3.19 \text{ CRE} + 2.59 \text{ POL} + 2.29 \text{ PES} + 2.89 \text{ JAM} + 1.89 \text{ MCQ} + 1.99 \text{ PDC} + 1.99 \text{ ESP} + 2.49 \text{ PAV} \quad (1)$$

Como se menciona en el párrafo anterior, es necesario establecer las restricciones del modelo, para acotar las posibles soluciones. En el presente ejemplo, dichas restricciones están asociadas a los porcentajes de cada nutriente con el fin de establecer 700% y 2000% como mínimo y máximo respectivamente.

El porcentaje total del requerimiento de vitamina A viene dado por una fórmula similar, excepto que CRE, POL, etc. se multiplican por el porcentaje por paquete en lugar del costo por paquete como se muestra en la ecuación (2)

$$700 \leq 60 CRE + 8 POL + 8 PES + 40JAM + 15 MCQ + 70PDC + 25 ESP \quad (2)$$

$$+ 60 PAV \leq 2000$$

Esta cantidad debe ser mayor o igual al 700%. Hay una fórmula similar para cada una de las otras vitaminas, y cada una de estas también debe ser ≥ 700 . Dichas ecuaciones se pueden ver de la (4) a la (7), adicionalmente se establecen números de paquetes mínimos y máximos por tipo de producto en la ecuaciones (8) a (15). Si se reúnen todas las ecuaciones, se obtiene el siguiente problema lineal:

Función objetivo:

$$\text{Costo Total} = 3.19 CRE + 2.59 POL + 2.29 PES + 2.89 JAM + \quad (3)$$

$$1.89 MCQ + 1.99 PDC + 1.99 ESP + 2.49 PAV$$

Restricciones:

$$700 \leq 60 CRE + 8 POL + 8 PES + 40JAM + 15 MCQ + 70PDC + 25 ESP \quad (4)$$

$$+ 60 PAV \leq 2000$$

$$700 \leq 20 CRE + 0 POL + 10 PES + 40JAM + 35 MCQ + 30PDC + 50 ESP \quad (5)$$

$$+ 20 PAV \leq 2000$$

$$700 \leq 10 CRE + 20 POL + 15 PES + 35JAM + 15 MCQ + 15PDC + 25 ESP \quad (6)$$

$$+ 15 PAV \leq 2000$$

$$700 \leq 15 CRE + 20 POL + 10 PES + 10JAM + 15 MCQ + 15PDC + 15 ESP + 10 PAV \leq 2000 \quad (7)$$

$$2 \leq CRE \leq 10 \quad (8)$$

$$2 \leq POL \leq 10 \quad (9)$$

$$2 \leq PES \leq 10 \quad (10)$$

$$2 \leq JAM \leq 10 \quad (11)$$

$$2 \leq MCQ \leq 10 \quad (12)$$

$$2 \leq PDC \leq 10 \quad (13)$$

$$2 \leq ESP \leq 10 \quad (14)$$

$$2 \leq PAV \leq 10 \quad (15)$$

La solución del ejemplo planteado puede ser dada resolviendo el sistema de ecuaciones que es generado a partir de las restricciones y posteriormente ingresando los valores obtenidos en la FO.

2.1.5 Optimización multiobjetivo

En los problemas de optimización multiobjetivo se tiene un conjunto de objetivos que se desean optimizar. Los objetivos presentan un grado de conflicto por lo que no existe una solución que los optimice todos de manera simultánea. El objetivo en estos problemas es encontrar el conjunto de soluciones eficientes. Dichas soluciones son matemáticamente igual de buenas. Existen diferentes metodologías para la resolución de problemas multiobjetivo, algunos de ellos son: el método de la suma ponderada, de restricción- ϵ o el método Lexicográfico.

La función (16) representa el modelo en el que se desarrollan los problemas de optimización multiobjetivo:

$$\text{Min } (f_1(x), \dots, f_k(x))^T \quad (16)$$

Tal que $x \in X$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$ es un conjunto factible, y $k \geq 2$. En este tipo de problemas se asume que las funciones objetivo son conflictivas por naturaleza. Por lo tanto, no existe una única solución óptima para el problema, sino un conjunto de soluciones eficientes (Jornada & Leon, 2016).

El método de restricciones épsilon es usado para encontrar el conjunto de soluciones eficientes antes mencionado. En este método uno de los objetivos se selecciona como única función objetivo a optimizar, mientras que las funciones objetivo restantes se convierten en restricciones. Sin embargo, para reducir el impacto que esto implica se le modifican sus límites.

2.1.6 Herramientas de optimización

Existen diversos software de apoyo para la solución de problemas de optimización, entre los más conocidos se pueden mencionar GAMS, AMPL, AIMMS y XPRESS-MP (Ramos, Sanchez, Ferrer, Barquin, & Linares, 2010).

GAMS¹ es el software con mayor antigüedad, pero con una gran cantidad de usuarios, actualmente tiene algunas limitaciones en la capacidad de modelado. AMPL² es un software más nuevo con gran potencia para el modelado. Sin embargo, al ser más reciente el conjunto de usuarios es menor.

¹ <https://www.gams.com/>

² <https://ampl.com/>

Por otra parte han surgido nuevas librerías especializadas, tal como es el caso de PYOMO³, cuya capacidad central es la optimización estructurada. Se puede utilizar para definir problemas simbólicos generales, crear instancias de problemas específicos y resolverlas utilizando solucionadores comerciales y de código abierto, todo lo anterior mediante una interfaz de programación.

En la Tabla 3 se realiza una comparación del software disponible, con la finalidad de elegir uno para la validación del presente proyecto. Se pueden apreciar las cuatro principales opciones del mercado junto a sus características más importantes.

Tabla 3. Comparación de software de optimización

Aspectos	GAMS	AMPL	AIMMS	PYOMO
Licencia	\$	\$	\$\$	Gratis
VARIABLES disponibles	Media	Media	Alta	Alta
Comandos avanzados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Manipulación de datos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Visualización	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	difícil
Algoritmos de solución	limitado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	limitado

Se propone AMPL como herramienta de validación del modelo de optimización para el presente trabajo terminal. Dicha herramienta es elegida ya que brinda los mayores beneficios de los cuatro comparados anteriormente, el costo de la licencia se elimina ya que la versión educativa brinda la cantidad necesaria de variables requerida para el presente trabajo. De manera introductoria se resolverá el ejemplo 1 presentado en la sección 2.1.4.

El modelo integra dos cosas: nutrientes y alimentos. Por lo que se empieza un modelo de AMPL declarando los conjuntos correspondientes:

```
set NUTR;
```

³ <http://www.pyomo.org/>

set FOOD;

A continuación, es necesario especificar los números requeridos para el modelo. Por lo que se debe dar un costo positivo para cada alimento:

param cost {FOOD} > 0;

De igual manera se especifica que para cada alimento hay límites inferiores y superiores en el número de paquetes en la dieta:

param f_min {FOOD} >= 0;

param f_max {j in FOOD} >= f_min[j];

Es importante notar que se necesita un índice ficticio j para repasar el conjunto denominado “FOOD” en la declaración de f_max , para indicar que el máximo de cada alimento debe ser mayor o igual al mínimo correspondiente. Adicionalmente, es necesario especificar los límites inferiores y superiores en cantidad de cada nutriente en la dieta:

param n_min {NUTR} >= 0;

param n_max {i in NUTR} >= n_min[i];

Finalmente, para cada combinación de un nutriente y un alimento, es necesario un número que represente la cantidad del nutriente en un paquete del alimento. Es decir, “amt” estará en función de la lista de nutrientes y de alimentos.

param amt {NUTR,FOOD} >= 0;

El parámetro amt requiere dos índices. Por ejemplo, amt [i, j] es la cantidad de nutriente i en un paquete de alimentos j .

Las variables de decisión para este modelo son los números de paquetes para comprar de los diferentes alimentos, los cuales serán guardados en la variable “Comprar”.

var Comprar {j in FOOD} >= f_min[j], <= f_max[j];

El número de paquetes de los alimentos que se comprarán serán almacenados en $Comprar[j]$; y en cualquier solución aceptable, tendrá que estar entre $f_min [j]$ y $f_max [j]$.

El costo total de comprar un alimento j es el costo por paquete, $costo[j]$, multiplicado por el número de paquetes, $Comprar[j]$. El objetivo que se debe minimizar es la suma de este producto en todos los alimentos j :

minimize Costo_Total: $\sum \{j \text{ in FOOD}\} costo[j] * Comprar[j]$;

De manera similar, la cantidad de un nutriente que suministre un alimento j es el nutriente por paquete, $amt [i, j]$, multiplicado por el número de paquetes que compra $[j]$. La cantidad total de nutrientes que suministre es la suma de este producto en todos los alimentos j :

$\sum \{j \text{ in FOOD}\} amt[i,j] * Comprar[j]$

Para completar el modelo, solo necesitamos especificar que cada suma debe estar entre los límites apropiados. Nuestra declaración de restricción comienza

subject to Dieta $\{i \text{ in NUTR}\}$:

para decir que se debe imponer una restricción llamada Dieta $[i]$ para cada miembro i de NUTR. El resto de la declaración proporciona la declaración algebraica de la restricción para el nutriente i : las variables deben satisfacer

$n_min[i] \leq \sum \{j \text{ in FOOD}\} amt[i,j] * Comprar[j] \leq n_max[i]$

Una "doble desigualdad" como esta se interpreta de la siguiente manera: el valor de la suma en el medio debe estar entre $n_min [i]$ y $n_max [i]$. El modelo completo se muestra en la Figura 4.

```

set NUTR;

set FOOD;

param cost {FOOD} > 0;

param f_min {FOOD} >= 0;

param f_max {j in FOOD} >= f_min[j];

param n_min {NUTR} >= 0;

param n_max {i in NUTR} >= n_min[i];

param amt {NUTR,FOOD} >= 0;

var Buy {j in FOOD} >= f_min[j], <= f_max[j];

minimize Total_Cost: sum {j in FOOD} cost[j] * Buy[j];

subject to Diet {i in NUTR}:

n_min[i] <= sum {j in FOOD} amt[i,j] * Buy[j] <= n_max[i];

```

Figura 4. Modelo en AMPL del ejemplo 1 (dieta.mod).

2.1.7 Ubicación de instalaciones

La localización de instalaciones es un problema que está orientado a minimizar los costos de las diversas operaciones generadas con el fin de producir biocombustible. Por lo tanto, la solución de este problema requiere de un análisis económico, ambiental y social (Duarte, 2015). Las biorrefinerías han sido el centro de atención en las investigaciones de los últimos años en el sector energético (Aguilar-Rivera, Algara-Siller, Olvera-Vargas, & Michel-Cuello, 2018; Serrano-Hernandez, Faulin, Pintor, & Belloso, 2017), son la mejor opción para transformar los diferentes tipos de biomasa en biocombustibles, es por eso que la localización de las plantas de transformación debe ser evaluada mediante métodos de optimización.

2.2 MARCO CONTEXTUAL

A continuación, se presentan los trabajos realizados acerca de la biomasa, tecnologías de transformación y la localización de biorrefinerías, así como las metodologías empleadas para la toma de decisiones. La literatura presentada tendrá el objeto de contextualizar el problema y los objetivos de investigación.














2.2.1 Principales biomásas de México

En la actualidad, la generación eléctrica de México proviene principalmente de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas), de esto resulta una alta concentración de CO₂, motivo por el cual se están impulsando nuevas fuentes de energía. México tiene un alto potencial para diferentes biomásas debido a la diversidad de climas y regiones con las que cuenta.

La deforestación y la degradación de los bosques son la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. Los bosques absorben CO₂, pero cuando se deterioran o destruyen se convierten en una "fuente" liberando CO₂ a la atmósfera. La biomasa viva, los desechos leñosos y la materia orgánica del suelo son los principales depósitos de carbono en los ecosistemas de los bosques tropicales (Gibbs, Brown, Niles, & Foley, 2007). México tiene 648,000 km² de bosques (FAO, 2010) que se extienden en aproximadamente un tercio del territorio nacional, de los cuales 320'000 km² son de bosque tropical (Comunicado de prensa Semarnat, 2014), área de la cual surgen toneladas de residuos con potencial energético.

El Mapa Mexicano de Uso y Vegetación del Suelo (INEGI, 2014) desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) utiliza una combinación de interpretación visual de imágenes ópticas y verificación de campo para crear un mapa de uso del suelo (Figura 5). En el mapa se aprecia la diversidad forestal por estado (Las leyendas correspondientes se encuentran en la Tabla 4).

Tabla 4. Leyendas del Mapa de México de uso y vegetación del suelo basado de INEGI

Color	Tipo	Color	Tipo
	Áreas sin vegetación		Selva caducifolia
	Bosque de coníferas		Selva espinosa
	Bosque de encino		Selva perennifolia
	Bosque mesófilo de montaña		Selva subcaducifolia
	Matorral xerófilo		Vegetación hidrófila
	Otros tipos de vegetación		Vegetación inducida
	Pastizal		

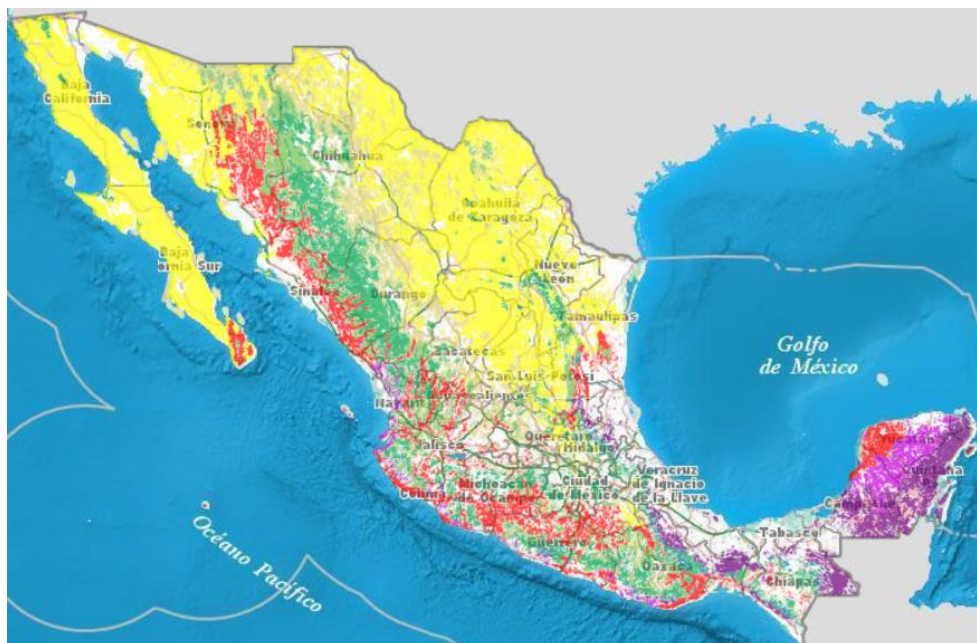


Figura 5. Zonas forestales de México según INEGI

Los residuos forestales se han considerado como biomasa alternativa para la producción de biocombustible. Sin embargo, ya que tienen baja densidad se obtienen altos costos de transporte debido a su volumen. Martínez, presenta un caso de estudio (Martínez-Guido, Ríos-Badrán, Gutiérrez-Antonio, & Ponce-Ortega,

2019) en el que se indica que es posible satisfacer el 50% de la demanda de las centrales mediante el uso de biomasa residual. Estos residuos serán clave para la producción de diversos biocombustibles, por lo que es necesario conocer las regiones con mayor porcentaje de producción y sus respectivos volúmenes.

Al igual que la producción forestal, el cultivo de caña de azúcar representa grandes volúmenes de biomasa en México a tal grado que es el séptimo productor de azúcar a nivel mundial (Aguilar-Rivera et al., 2018), por lo que será el segundo tipo de materia energética a estudiar. El tallo de la caña de azúcar se considera un fruto agrícola, posee aproximadamente 75% de agua y está formado por nudos y entrenudos. La caña de azúcar es cultivada en 22 entidades federativas (SAGARPA, 2017)

El bagazo de caña de azúcar es un sustrato excelente para la producción de diversos compuestos bioquímicos y enzimas a través de la fermentación (Sindhu, Gnansounou, Binod, & Pandey, 2016). El residuo de la cosecha de caña de azúcar es rico en celulosa y hemicelulosa, por lo que puede usarse para la producción de bioetanol, biodiesel entre otros.

Otro producto agrícola con gran potencial como biocombustible es el maíz, dicho producto se puede obtener por riego o en temporal; el primero ocupa alrededor del 60% del territorio nacional (Montesillo-Cedillo, 2017). Si bien el maíz es una opción viable como materia prima en cuanto a volumen de producción, ya que se pueden generar 372 litros aproximadamente a partir de una tonelada (Donato & Beltrán, 2004) éste beneficio no se compara con el impacto que tiene en el sector alimenticio, ya que la mayor parte está destinado a este sector, por lo que el usarlo como materia prima para biocombustibles crearía una escasez en el mercado y aumentaría los precios.

Finalmente, se tiene como biomasa el aceite de cocina usado (ACU), dicha biomasa se toma por el alto impacto que tiene en la contaminación del suelo y del agua. La producción de biodiesel a partir de aceite vegetal comestible resulta con un costo elevado debido al precio de la materia prima. Sin embargo, los costos del aceite de cocina usado son mucho más baratos, por lo que se tiene una viabilidad económica

para la producción (Mohammadshirazi, Akram, Rafiee, & Bagheri Kalhor, 2014) (Hussain, Samad, & Janajreh, 2016).

Actualmente un porcentaje de la industria generadora de ACU no cuenta con un adecuado sistema de desecho, por lo que la descarga del ACU a desagües o alcantarillas crean problemas de contaminación del agua y el suelo (Sheinbaum-Pardo, Calderón-Irazoque, & Ramírez-Suárez, 2013), dicho problema es más notorio en las zonas metropolitanas, ya que se encuentran mayor número de restaurantes, cocinas, hoteles, entre otros.

El aprovechamiento de los diferentes tipos de biomasa representa una ganancia económica y un beneficio al medio ambiente, debido principalmente al bajo costo de la materia prima y a los biocombustibles cuya generación de CO₂ es menor a los combustibles derivados del petróleo. Para el aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos se requieren del uso de tecnologías de transformación, las cuales se presentan a continuación.

2.2.2 Tecnologías de transformación de biomasa

En el proceso de transformación de biomasa existen diversas tecnologías y/o métodos. Para la producción de biodiesel se han desarrollado tres tecnologías de conversión principales: catálisis ácido/base, catálisis enzimática y tecnología de fluido supercrítico (SCF) (Yan & Yan, 2017). Para el tratamiento de residuos forestales existen procesos termoquímicos (combustión, gasificación y pirólisis) y bioquímicos (fermentación, transformación bacteriana e hidrólisis) (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018) los cuales dan origen a diversos combustibles (bioetanol, bioaceites o biogás).

2.2.2.1 Transesterificación con catalizadores de base alcalina para aceite de cocina usado

El principal componente de los aceites son los triglicéridos, en este método de producción los triglicéridos pasan por etapas en las que se convierten en diglicéridos, monoglicéridos y finalmente se convierten en glicerol. Se ha demostrado en estudios previos que el metanol es el alcohol más adecuado para la reacción catalizadora (Ehsan & Chowdhury, 2015) y es el más usado debido a su bajo costo (Wang, Pengzhan Liu, & Zhang, 2007).

En cuanto a los catalizadores de base alcalina se pueden usar metóxido de sodio, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y metóxido de potasio. Es el proceso más usado, debido a su alta tasa de conversión (98%) y a sus requerimientos básicos (temperatura y presión moderadas) (Math, Kumar, & Chetty, 2010). Un punto importante de este método es que se requiere un nivel de ácido graso menor a 1% ya que de lo contrario se reduce la tasa de conversión.

2.2.2.2 Transesterificación catalizada por ácido para aceite de cocina usado

Se usan ácidos fuertes como catalizadores, éstos pueden ser, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico y ácido sulfónico orgánico (Math et al., 2010). A comparación del método anterior, la reacción no genera jabón. Sin embargo, la transesterificación de los triglicéridos es muy lenta, tardando varios días en completarse (Marchetti, Miguel, & Errazu, 2007). Al igual que en la reacción alcalina, si se usa un exceso de alcohol en el proceso, se obtiene una mayor tasa de conversión de los triglicéridos.

El rango de temperatura varía de 55 a 80 °C. Este proceso es una excelente manera de producir biodiesel si la muestra tiene un contenido relativamente alto de ácidos grasos libres a diferencia de la transesterificación con catalizadores alcalinos, por lo que puede decir que la selección de un proceso particular depende de la cantidad de ácido graso libre.

2.2.2.3 Transesterificación catalizada por enzimas.

El biodiesel puede producirse a partir de un proceso de transesterificación biocatalítica en presencia de enzimas, requiere temperaturas de 35 a 45°C (Math et al., 2010). Las reacciones enzimáticas son insensibles al contenido de ácidos grasos libres y agua de la materia prima. Sin embargo, el rendimiento máximo no alcanza 80% en condiciones óptimas (Gharat & Rathod, 2013). Adicionalmente, la transesterificación enzimática aún no se ha utilizado en una escala mayor, ya que las lipasas comerciales se limitan principalmente al costo y al largo tiempo de reacción (Amini, Ilham, Ong, Mazaheri, & Chen, 2017). Por todo lo anterior se considera que la reacción enzimática requiere más investigación

2.2.2.4 Transesterificación supercrítica no catalizada.

Este proceso de transesterificación requiere un tiempo muy corto, 4 minutos aproximadamente. Sin embargo, demanda condiciones supercríticas, así como una alta proporción de alcohol-aceite (42:1), lo cual hace al proceso inviable en cuanto a costos, por lo que se necesita más trabajo de investigación para hacerlo económica y tecnológicamente viable.

2.2.2.5 Fermentación de caña de azúcar

La producción de etanol se puede realizar desde diferentes etapas de la caña de azúcar, el jugo extraído de la caña puede usarse para la producción de azúcar o bien, puede ser fermentado para obtener el etanol, si se produce azúcar se obtiene melaza de la cual posteriormente se produce etanol (Marin Pons & Asociados, 2012).

La forma más común de obtener etanol es a partir de la melaza, dicho proceso se muestra en la Figura 6, este proceso da como resultado un etanol del 99.5% lo que

denota la pureza del producto. La tasa de producción oscila en .225L/Kg (litro de etanol por kilogramo de melaza) (Nguyen & Gheewala, 2008).

Diversos estudios (de Araujo Guilherme, Dantas, Padilha, dos Santos, & de Macedo, 2019) han reportado eficiencias de hasta 92% del rendimiento teórico utilizando como biomasa el bagazo de la caña de azúcar

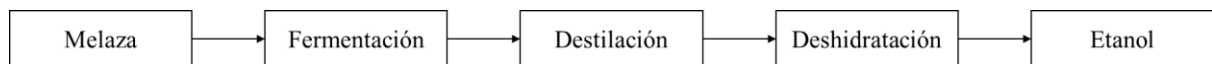


Figura 6. Proceso del Etanol. Elaborado a partir de (Nguyen & Gheewala, 2008)

2.2.2.6 Pirólisis

La pirólisis es el término dado a la despolimerización térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Dhyani & Bhaskar, 2018). Es un proceso de descomposición mediante oxidación incompleta, el cual generará compuestos en los tres estados de la materia (Cerdá Tena, 2012). El volumen de los productos obtenidos depende directamente de la temperatura y el tiempo que se utilicen en el proceso. Dependiendo de las condiciones del proceso (temperatura y tiempo), el proceso de pirólisis se puede clasificar en las siguientes categorías.

Pirólisis rápida. El principal requisito para este proceso es una alta tasa de transferencia de calor, por lo que los parámetros que están involucrados en el proceso se controlan cuidadosamente con la finalidad de obtener el mayor rendimiento de biodiesel. Las temperaturas de este proceso oscilan entre 450 a 600°C con tiempos muy cortos, generalmente menores a dos segundos.

Pirólisis intermedia. Los biocombustibles obtenidos tienen bajo rendimiento de alquitrán y viscosidad si son comparados con los de la pirolisis rápida. En este proceso pueden ser usados grandes tamaños de biomasa (gruesa, triturada o molida). Se lleva a cabo en el rango de temperatura de 300 a 500 °C.

Pirólisis lenta. A diferencia de los procesos anteriores, este método tiene tiempos de residencia prolongados. La velocidad de calentamiento es lenta y la temperatura a la cual llegar es considerablemente menor que en los anteriores tipos de pirólisis. Al ser un proceso más estable con un cambio gradual en las variables es posible tener materia prima con mayor contenido de humedad. Este proceso es usado generalmente para obtener biocombustibles sólidos. Sin embargo, también se pueden obtener líquidos.

2.2.2.7 Fermentación de madera

Un proceso bioquímico para la obtención de energía de los residuos forestales es la fermentación con levaduras. Los principales productos son etanol, butanol y acetona (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018). A pesar de que las levaduras son el elemento principalmente usado para este proceso, también existen registros con hongos filamentosos y bacterias, por su parte Song indica una tasa de conversión de 98% (Song et al., 2019) en caso de usar enzimas específicas (xilanasas).

2.2.2.8 Fermentación con levaduras modificadas

A diferencia del proceso anterior, las levaduras usadas se han modificado genéticamente lo que propicia la secreción de moléculas farneseno durante la fermentación. El combustible obtenido de este proceso es el biodiesel.

2.2.2.9 Transformación bacteriana

La transformación bacteriana de residuos forestales se realiza en ausencia de oxígeno (digestión anaerobia) a temperaturas que oscilan entre 30°C y 65°C. El combustible generado es biogás, con una concentración de metano de 97%, el porcentaje restante es dióxido de carbono y otras impurezas (Ayala-Mendivil &

Sandoval, 2018). Si bien, el metano es el principal combustible producido, de igual manera se puede generar acetona, butanol y etanol.

2.2.2.10 *Mejora hidrotermal*

El rango de temperaturas del proceso va de 300 a 360°C, en el cual los residuos maderables se despolimerizan. El producto obtenido es un biocrudo con un valor calorífico de 30 a 35MJ/kg (Rackemann et al., 2011). Durante el proceso la materia prima llega a temperaturas entre 80 a 230°C y una presión de 12 a 18MPa.

2.2.2.11 *Gasificación*

El bagazo de la caña de azúcar puede ser procesado mediante gasificación, sin embargo, este proceso tiene requerimientos técnicos elevados en comparación con anteriores tecnologías, durante el proceso la materia prima llega a temperaturas entre 800 – 1000°C requiriendo también presiones de hasta 20 Bars (Ramirez & Rainey, 2019). El principal producto es gas de síntesis cuyos componentes principales son hidrogeno y monóxido de carbono.

2.2.3 Contexto general de la localización de instalaciones

En la revisión bibliográfica se hace notoria la preocupación por una planeación para el establecimiento de nuevas plantas, Gregory Theyel (Theyel, 2012) sostiene la importancia de clientes y proveedores locales, afirma que es necesario integrar los factores de sostenibilidad para alcanzar los beneficios económicos, sociales y ambientales en la innovación local, y de esta forma aumentar el valor de producción.

Dweiri en su trabajo de localización de plantas desalinizadoras mediante decisión multicriterio (Dweiri, Ahmed, & Almulla, 2018) indica la importancia de incluir los aspectos de sustentabilidad así como los económicos y sociales. Para la

implementación de la metodología es usado el proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés). La metodología es dividida en dos fases, en la primera se identifican los criterios y se validan, en la segunda se desarrolla una ponderación de criterios y subcriterios con el fin de realizar un análisis detallado. En los resultados se indica que los aspectos técnicos, económicos y ambientales (21.9%, 20.9% y 19.9% respectivamente) son los tres más importantes que necesitan ser considerados en el modelo de selección.

Diversas áreas tienen costos ineficientes para transmitir energía eléctrica, esto se debe a su localización casi inaccesible., es por eso que se han realizado investigaciones para la localización de plantas en áreas remotas (Ghadimi, Razavi, & Mohammadian, 2011) con el fin de establecer la viabilidad en cuanto a la capacidad de energía a producir. Ghadimi plantea en su trabajo utilizar la energía hidráulica de los ríos para crear pequeñas plantas hidroeléctricas en puntos estratégicos de Lorestan, Irán. Como resultado del trabajo se obtiene que, en efecto, resulta viable crear micro plantas que generen la electricidad para las zonas rurales reduciendo los costos de redes eléctricas.

2.2.4 Localización de plantas de biocombustible

Diversos autores han realizado contribuciones de investigación en la localización de plantas de biocombustibles, (Duarte, 2015) diseña una metodología para la localización de instalaciones desde un enfoque de cadena de suministro; en ella se evidencia la factibilidad de la implementación en el contexto colombiano y permite identificar los flujos de materia entre los diferentes eslabones. Así mismo cuantifica la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y brinda ubicaciones para plantas de bioetanol y biodiesel.

(Corsano, Vecchiatti, & Montagna, 2011) propone un modelo de optimización multicriterio no lineal para un diseño sostenible y un análisis del comportamiento de la cadena de suministro de azúcar/etanol. Del mismo modo Corsano realiza un modelo detallado para el diseño de plantas de etanol. El diseño está integrado en

el modelo de cadenas de suministro, por lo tanto, los diseños de planta y cadenas de suministro se obtienen simultáneamente. La inclusión de cuestiones de sostenibilidad en el modelo produce cambios tanto económicos como operativos. La optimización simultánea de estos elementos permite la evaluación de varios compromisos entre las variables de diseño y proceso.

La función objetivo del modelo consiste en maximizar la utilidad dada por la suma de las ganancias totales (azúcar exportado, electricidad exportada, etanol y venta de levadura entre otros) menos los costos totales (compra de caña de azúcar, costos de producción, inversión en plantas de etanol, costos de transporte entre otros).

(López-Díaz, Lira-Barragán, Rubio-Castro, Ponce-Ortega, & El-Halwagi, 2017) integra en su modelo de localización de plantas, las extracciones y descargas de agua asociadas a la producción. Por otro lado Bowling considera el comportamiento no lineal de la economía de escala (Bowling, Ponce-Ortega, & El-Halwagi, 2011), el modelo busca la configuración óptima para el procesamiento y la distribución de biocombustible con el fin de obtener la utilidad máxima neta total.

La localización de plantas puede ser realizada con diferentes metodologías, de entre ellas se encuentra desarrollar un modelo de programación lineal mixta, el cual generará los vértices de la región óptima. (Serrano-Hernandez et al., 2017) selecciona criterios ambientales y económicos para incluirlos en la función objetivo. Adicionalmente, acota el problema en el norte de Navarra, España y añade como restricción al sistema, la disponibilidad de biomasa (cebada, arroz, avena, maíz entre otros) para evitar escasez ya que podría generar impacto en los precios. Acotado el volumen de biomasa se determina el tamaño de la biorrefinería.

(Murillo-Alvarado et al., 2015) plantean un modelo de optimización multiobjetivo para el tratamiento de residuos de la industria tequilera en México. El tema se plantea como cadena de suministro, cuyo fin es la producción de bioetanol, dando resultados favorables para la inversión en biorrefinerías.

Capítulo III. OBJETIVOS

3.1 Justificación

Los biocombustibles han tomado importancia en los últimos años, por lo que el análisis y optimización de su cadena de suministro es importante para un desarrollo exitoso. Por lo que la ubicación estratégica de plantas productoras de biocombustibles es importante para su desarrollo como tecnologías emergentes.

El consumo de biocombustibles impactará al medio ambiente con la reducción de gases de efecto invernadero al disminuir el consumo de combustibles fósiles, así mismo permitirá el uso de materia orgánica que se consideraba desperdicio e impulsará la investigación hacia la nueva generación de biocombustibles (O'Connell, Kousoulidou, Lonza, & Weindorf, 2019; Thornley, Chong, & Bridgwater, 2014). El uso eficiente de la biomasa reducirá de manera significativa los desperdicios de la zona y alrededores en la que se establezca una biorrefinería, adicionalmente se generarán empleos, lo que favorecerá el desarrollo industrial de la zona.

Actualmente el Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio) está dedicado al desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento sustentable de energía de la biomasa, el presente trabajo es desarrollado como parte del proyecto

Este trabajo propone esclarecer el camino de la investigación de los biocombustibles en el proceso de ubicación de nuevas biorrefinerías, estableciendo los lugares óptimos considerando el costo y volumen de producción. De esta manera se tendrá un panorama amplio de los lugares viables a invertir, lo cual genera un impacto en la confiabilidad de los inversionistas.

Se analizarán los resultados del modelo de optimización. Estos resultados representan un alto potencial de producción a un bajo costo, ya que se busca disminuir el costo de oportunidad.

3.2 Planteamiento del problema

Los combustibles generados a partir de biomasa tienen un auge en el sector científico. La escasez de las fuentes de combustible fósiles, así como el impacto al medio ambiente de estos han sido los principales motivos por el que las instituciones gubernamentales buscan nuevas fuentes de energía. Las incertidumbres en los precios del petróleo y la volatilidad son actualmente una realidad. El estudio de la biomasa como fuente de biocombustible es fundamental para el desarrollo de las energías limpias, así mismo se reduce los índices de materia orgánica considerada desperdicio.

Las biorrefinerías son uno de los pilares de la investigación actual en materia energética, en los últimos años se ha consolidado como la mejor manera de generar biocombustibles (Moncada B, Aristizábal M, & Cardona A, 2016). El éxito de una biorrefinería dependerá del uso óptimo de sus recursos, así como de un análisis detallado para la reducción de costos a lo largo de la cadena de producción.

Si bien en México existe gran variedad biomasa, es importante clasificar el territorio mexicano por regiones que tengan una predominancia hacia un tipo de ésta, así mismo, se tiene que evaluar la capacidad de las tecnologías aplicadas en el proceso de producción de los biocombustibles, con el fin de establecer una nueva rama del sector energético que sea eficiente, y permita una base sólida ante la incursión al mercado.

Actualmente existen estudios de biorrefinerías en México, ya que se obtienen grandes volúmenes de biomasa que puede ser utilizada (Comunicado de prensa Semarnat, 2014; SAGARPA, 2017). Sin embargo, la información recabada, aún es insuficiente para el desarrollo óptimo de biorrefinerías.

Por lo tanto, existe la necesidad de optimizar las principales variables en el desarrollo de biorrefinerías, siendo el costo y el volumen de producción las más importantes en este trabajo.

3.3 Objetivos

3.3.1 Objetivo general

Determinar ubicaciones óptimas para el desarrollo de biorrefinerías en México mediante un modelo de optimización multiobjetivo.

3.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los datos de entrada del modelo
- Seleccionar las principales zonas de México con mayor volumen de materia prima para la producción de biocombustible.
- Definir un modelo de optimización multiobjetivo, para la localización de biorrefinerías en México.
- Resolución teórica del modelo propuesto.

Capítulo IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo establece las propiedades de la investigación, así como la metodología que se empleará.

4.1 Tipo de investigación

El presente trabajo es de carácter exploratorio ya que el estudio de biomasa y biorrefinerías ha tomado importancia recientemente en México, particularmente después de la reforma energética del 2013, por lo que existen pocos estudios específicos aplicados para México. La temporalidad de la investigación es transversal, dado que los datos que se usaran son del año 2016-2017, información puntual tal como costo y volumen de materia prima. La investigación es de tipo documental ya que las fuentes de información serán los archivos y publicaciones realizadas con temas en común hasta el momento.

4.2 Enfoque

El enfoque mixto de investigación se considera una clase de investigación en la cual los investigadores combinan técnicas, métodos, aproximaciones, conceptos o lenguaje cuantitativo y cualitativo dentro de una misma investigación. La naturaleza del tema en el presente trabajo conduce a la combinación de los enfoques cuantitativo y cualitativo. Si bien se realizará un modelo matemático para establecer y/o solucionar el objetivo planteado usando la información recabada, será necesario utilizar ambos enfoques en el análisis e interpretación de resultados.

4.3 Diseño

Esta investigación es de tipo no experimental, los datos obtenidos no pueden ser manipulados/cambiados para crear escenarios. Se observan los fenómenos en el ambiente natural, tal como se ha presentado (volúmenes de producción, tipos de biomasa por región) para analizarlos.

4.4 Unidad de análisis

El territorio mexicano como productor de biocombustibles es el objeto de estudio del presente trabajo. El desarrollo de biorrefinerías dependerá de la capacidad de producción del país, así como de la viabilidad económica que representa la industria.

4.5 Metodología

La metodología en la que se fundamenta el presente proyecto es propuesta por Jorge León (Jornada & Leon, 2016). En el proyecto original, se aborda el problema en Texas, Estados Unidos, para la planificación y localización estratégica de plantas eléctricas. El problema es planteado mediante optimización multiobjetivo. Los objetivos principales son minimizar los costos de tecnologías durante la producción del biocombustible, y minimizar el consumo de agua. Se establece una metodología que constará de dos etapas, como se muestra en Figura 7. La primera etapa se centra en encontrar las soluciones eficientes en minimizar los costos tecnológicos y a su vez maximizar el potencial energético a producir. La segunda etapa encuentra un subconjunto de soluciones pertenecientes a la etapa anterior cuya distinción es la robustez ante la incertidumbre.

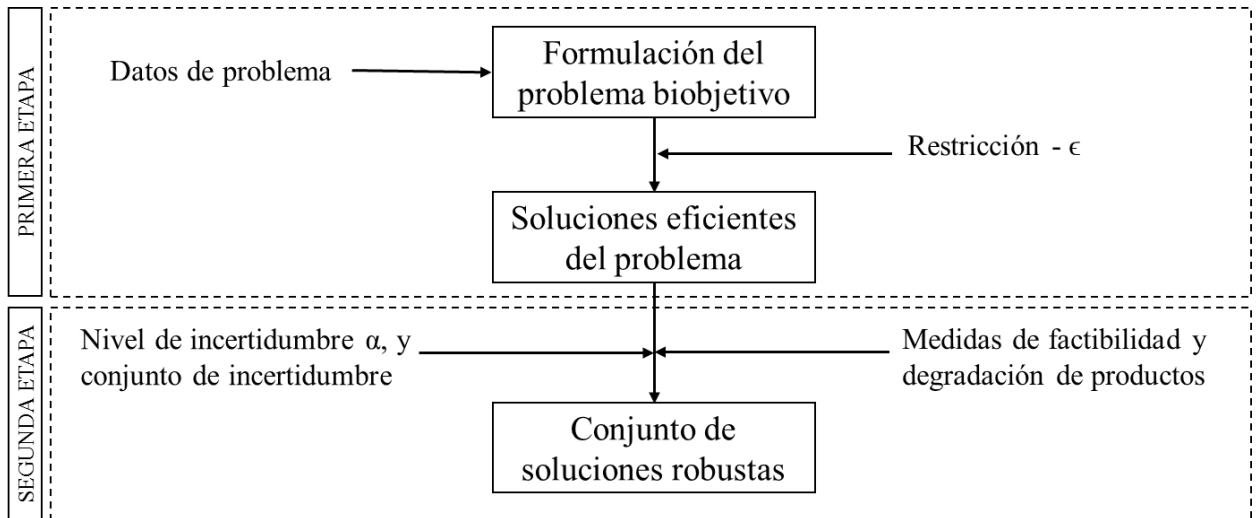


Figura 7. Fases de la metodología.

4.6 Metodología propuesta

La metodología que se propone, es basada en el trabajo de Jorge León (Jornada & Leon, 2016), la cual fue modificada y seccionada en cuatro fases (Figura 8), conservando el método de resolución. A continuación, la metodología propuesta se describe de forma detallada.

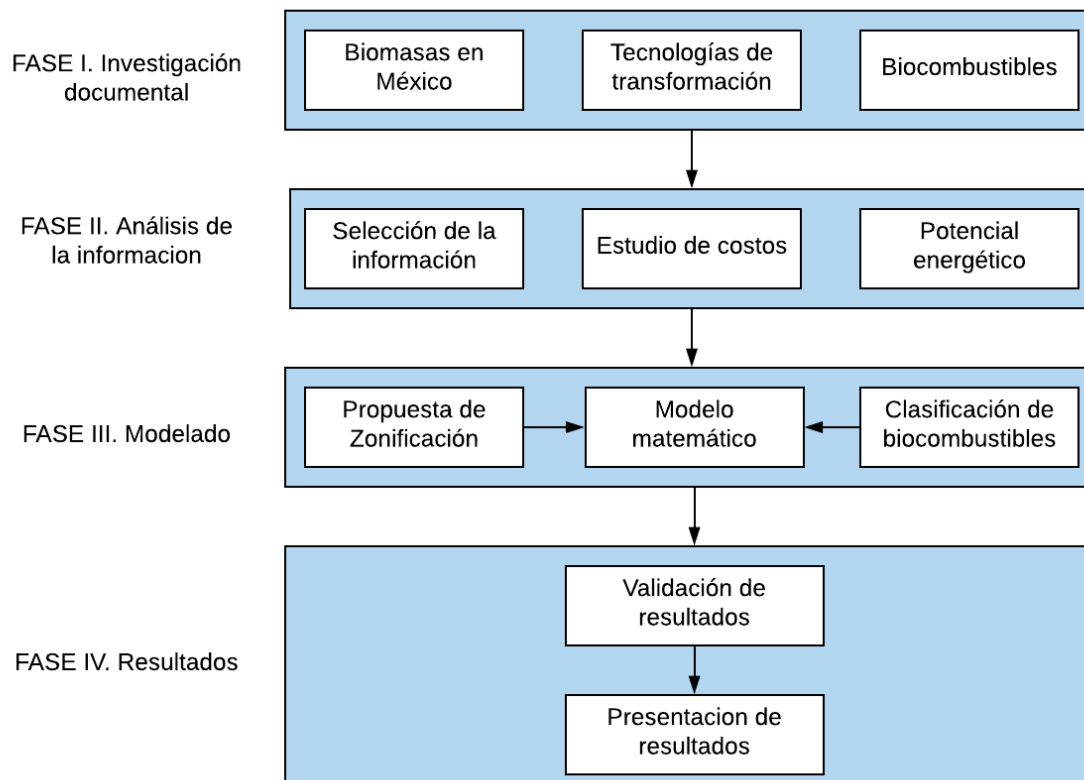


Figura 8. Metodología propuesta, elaboración propia a partir de Jorge León

4.6.1 Fase I. Investigación documental.

Se realiza una investigación para determinar los tipos de biomosas que serán estudiadas en el presente trabajo las cuales estarán sujetas a lo siguiente:

- Se excluirá biomasa de primera generación con impacto directo al sector alimenticio.
- La biomasa seleccionada será considerada desperdicio.

El primer punto tiene como finalidad evitar el impacto a los costos y disponibilidad de materia prima que se generan al competir en el sector alimenticio (Giraldo Ramírez, Arango Aramburo, & Martínez Jaramillo, 2014). Por otro lado, el segundo punto se basa en el aprovechamiento de la energía que no se encuentra dentro de la cadena de producción y que resulta con costos bajos en su adquisición.

De éstas biomásas seleccionadas, serán extraídos los valores de volumen de producción, así como las zonas en las que éstos se generan. Fuentes principales: artículos de divulgación científica, dependencias de gobierno tales como INEGI, SEMARNAT, CONADESUCA. Adicionalmente, se investigan las tecnologías existentes en el mercado y las nuevas tecnologías que se están desarrollando para la transformación de biomasa a biocombustible, así como sus costos asociados. Fuente principal: Artículos de divulgación científica. Finalmente se investiga a cerca de los biocombustibles actuales, las materias primas con las que son producidos, así como su potencial energético y metodología de producción. Fuente principal: artículos de divulgación científica.

4.6.2 Fase II. Análisis de información.

De la fase I se obtiene los tres principales tipos de biomasa que serán usados en presente trabajo con sus respectivos datos. En la presente fase los datos serán seleccionados según lo siguiente.

- Se incluirán los datos del Estado o Zona si estos son representativos según el principio de Pareto. (Volumen de materia prima en dicha zona). Lo anterior se establece para minimizar los costos logísticos ya que dichos valores pueden representar de un 22 a 49% del costo total del producto (Schwarz, 2017), por esta razón, se constituye como eje fundamental la disponibilidad de materia prima en el lugar seleccionado.
- Se seleccionan los costos asociados que se incluirán en el sistema, discriminando valores con un cambio menor al 10% según la zona geográfica, de igual manera se excluyen costos logísticos y se deja el estudio de estos valores para futuros trabajos.
- Se seleccionan los valores de potencial energético según el biocombustible que serán incluidos en el sistema.

De las zonas anteriormente seleccionadas se identifican las principales ciudades y se analizan los costos de energía eléctrica, agua potable y salario mínimo correspondiente.

4.6.3 Fase III. Modelado.

Usando la información seleccionada se proponen zonas con un alto volumen de producción de materia prima a nivel nacional. Los datos son agrupados por zona y le corresponde información de tipos de materia prima disponible, costos asociados y tecnologías disponibles. Se diseña el modelo matemático de optimización multiobjetivo el cual incluye las funciones objetivo y las restricciones que permiten acotar el problema a soluciones factibles.

Se diseñan dos funciones objetivo, la primera con la finalidad de minimizar los costos asociados a la producción y la segunda con el propósito de maximizar los volúmenes de biocombustibles producidos.

Las restricciones asociadas al problema multiobjetivo se plantean para acotar el problema hacia un conjunto de soluciones factible, de tal manera que se considera las limitaciones tecnológicas, así como la disponibilidad de la materia prima, los costos iniciales y la capacidad de producción según la zona.

4.6.4 Fase IV. Resultados.

La resolución teórica del trabajo se desarrolla al ingresar los datos previamente seleccionados, al modelo matemático de optimización multiobjetivo. De esta manera se obtendrá un vector de resultados en el que se detallará las ubicaciones/regiones óptimas (según las funciones objetivo) en la cual establecer una biorrefinería.

Para dicha validación se propone implementar el modelo matemático en un software (AMPL) que funcionará como herramienta de apoyo. En éste se establecen todas las ecuaciones involucradas, así como las condiciones de programación.

Finalmente, se propondrá un catálogo de la república mexicana en el que se establece el tipo de biocombustible a producir, así como la capacidad de producción de la biorrefinería.

Capítulo V. RESULTADOS

5.1 Análisis de la información

El presente apartado muestra la información recabada durante la investigación documental, y selecciona aquella que será utilizada en el modelo matemático.

5.1.1 Tipos de biomasa del sistema

Existe gran diversidad de biomasa disponible en México. Sin embargo, para la presente investigación se excluyen biomosas de primera generación, debido al impacto que genera al sector alimenticio. Adicionalmente se establecen las siguientes condiciones para su selección e inclusión en el estudio:

Entre las biomosas con mayor volumen de producción se destacan los residuos forestales y la caña de azúcar, lo que las convierte en fuentes viables para el presente estudio, por otra parte, se incluye el ACU debido al impacto ambiental que generan como residuos sin uso, y su bajo costo en comparación con aceites de primera generación. El presente estudio centrará sus objetivos en los tipos de biomasa mencionados, motivo por el cual se presenta la información relevante para cada una de ellas. La información ha sido seleccionada según el principio de Pareto.

Caña de azúcar

La producción de caña de azúcar en México representa un alto porcentaje de los cultivos agroindustriales, 865'310 hectáreas fueron sembradas en el 2016 (SAGARPA, 2017). La producción de caña molida ha incrementado de manera constante en los últimos años a nivel nacional, tal como se aprecia en la Figura 9.

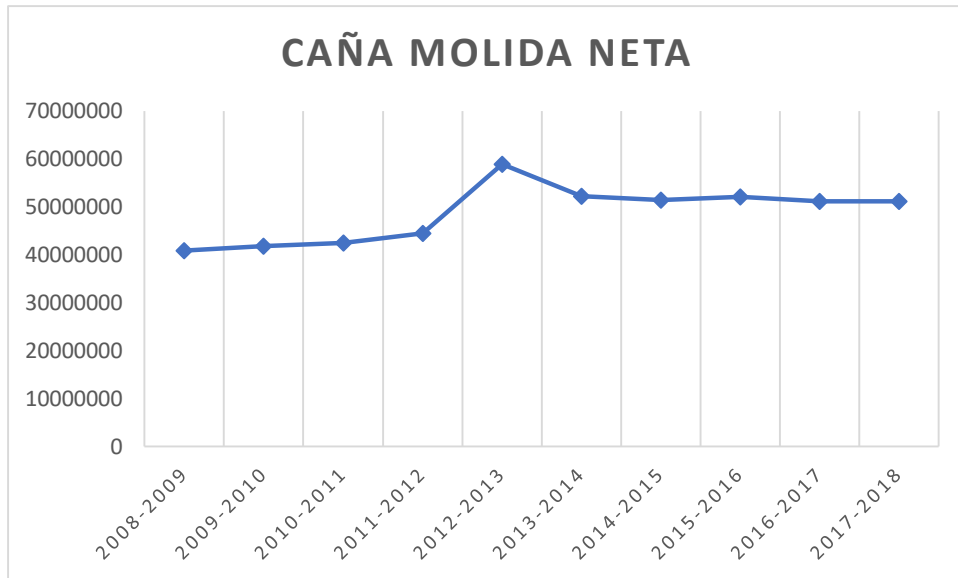


Figura 9. Producción de caña molida. Fuente CONADESUCA

Para el presente estudio se seleccionaron los 12 principales estados productores. Esto se considera ya que proporcionan el 95% de la producción del país. El procesamiento de biomasa para la producción de biocombustibles usa el bagazo de la caña, cada ingenio tiene un porcentaje diferente de este residuo, dicha información se encuentra resumida en la Tabla 5

Tabla 5. Producción de Caña de Azúcar. Elaboración propia basada en (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 2018a).

Estado	Producción de caña (T)	Bagazo generado (T)
Veracruz	20,767,421	6251043
Jalisco	6,126,653	1653278
San Luis Potosí	5,064,489	1487371
Oaxaca	2,914,109	894754
Chiapas	2,452,172	722184
Tabasco	2,438,500	763290
Nayarit	1,775,872	545976
Morelos	1,738,343	484327
Puebla	1,711,551	550457
Tamaulipas	1,579,124	493983
Quintana Roo	1,513,905	481822
Michoacán	1,030,492	294057

Aceite de cocina usado

La información para el ACU proviene de las 15 zonas metropolitanas más grandes del país, si bien actualmente no hay un censo nacional o departamento gubernamental que provea la información exacta de generación de ACU, se puede calcular en base al aceite consumido per cápita (Chikani Cabrera, 2018). La Tabla 6 muestra la estimación anual del ACU en m³ de las principales zonas metropolitanas.

Tabla 6. Estimación de ACU por zona metropolitana. Elaboración propia a partir de (Chikani Cabrera, 2018)

Zona metropolitana	ACU Producido
ZM del Valle de México	87240.5
ZM de Guadalajara	19233
ZM de Monterrey	17806.5
ZM de Puebla-Tlaxcala	11834
ZM de Toluca	8396.5
ZM de Tijuana	7595.5
ZM de León	6980
ZM de Juárez	5777
ZM de la Laguna	5272.5
ZM de Querétaro	4757.5
ZM de San Luis Potosí- Soledad de Graciano Sánchez	4512
ZM de Mérida	4219.5
ZM de Mexicali	4062.5
ZM de Aguascalientes	4043.5
ZM de Cuernavaca	4011.5

Residuos forestales

Para el presente estudio se han seleccionado los diez estados con mayor producción forestal según el anuario estadístico de la producción forestal de la SEMARNAT (SEMARNAT, 2016), la producción de dichos estados aporta el 88.2% del total nacional. Los volúmenes de producción en metros cúbicos del 2016 se enlistan en la Tabla 7, siendo el estado de Durango el mayor productor, contribuyendo con el 35% de la producción nacional para ese año.

Tabla 7 Estados de la republica con mayor producción forestal. Fuente SEMARNAT

Estado	Volumen
Durango	2,356,922
Chihuahua	884,457
Veracruz	522,506
Michoacán	447,478
Oaxaca	393,685
Jalisco	342,254
México	296,067
Puebla	291,738
Sonora	200,763
Guerrero	191,907

5.1.2 Costos de producción

Se analizaron los costos de materia prima, así como el costo de procesamiento según la tecnología, adicionalmente se consideran los costos de mano de obra, electricidad, agua y transporte logístico tal y como se muestra en la Figura 10

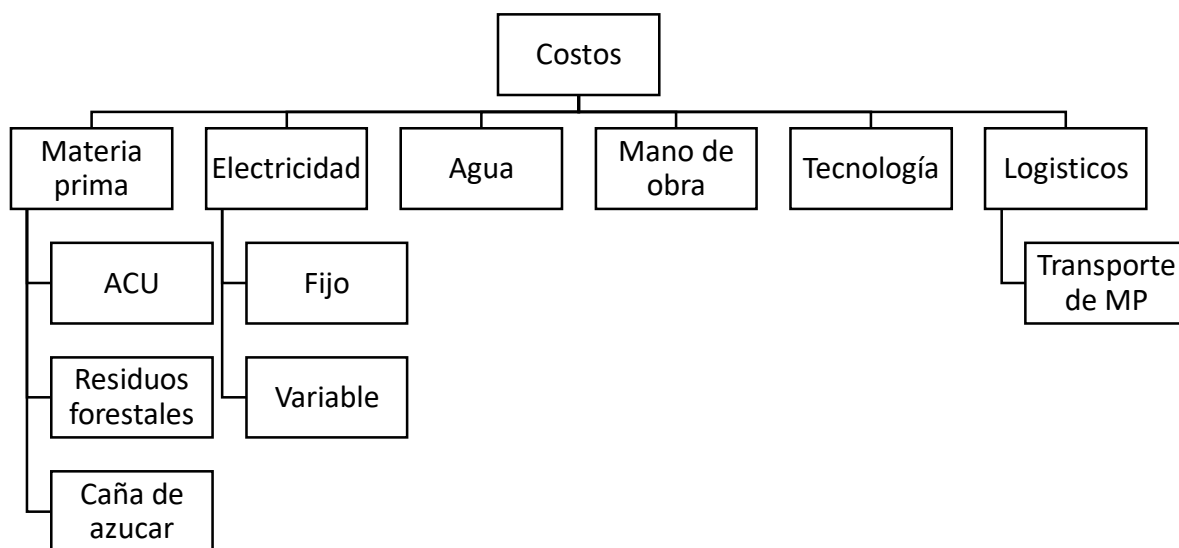


Figura 10. Costos asociados.

Costos de biomasa.

Para el caso de estudio se establece que el precio del ACU adquirido para su uso como materia prima es de ocho pesos el litro (Chikani Cabrera, 2018), se considera la recolección de la materia prima en las principales zonas metropolitanas del país, por lo que los costos por recolección son similares.

El costo de los residuos forestales se divide por zonas en las que el clima determina el tipo de maderas que existen en la región. Actualmente México tiene dos regiones establecidas, el clima templado frío y el clima tropical, el primero es ponderado según la producción forestal maderable estatal del género pino, mientras que la segunda por maderas preciosas (CONAFOR, 2016), los estados pertenecientes a cada región se pueden ver en la Tabla 8. Sin embargo, los costos asignados dependen de la clasificación asignada en la Tabla 9, siendo los estados restantes asignados a la zona “nacional”.

Tabla 8. Estados de las regiones de México.

Clima templado frío	Clima tropical
Chiapas	Campeche
Chihuahua	Quintana Roo
Durango	Tabasco
Guerrero	Veracruz
Jalisco	
Michoacán	
Oaxaca	
Puebla	

Tabla 9. Clasificación por costo de materia prima.

Norte	Centro	Sur
Chihuahua	Guerrero	Chiapas
Durango	Jalisco	Oaxaca
	Michoacán	
	Puebla	

El costo de los residuos forestales varía según el tamaño en el que se adquiere la madera, siendo los precios libres a bordo en brecha y libre a bordo en aserradero los más costosos. Para el presente trabajo se considera el precio de madera en pie, ya que la materia prima utilizada sería de uso secundario como se ha mencionado anteriormente. Los costos utilizados en pesos mexicanos se aprecian en la Tabla 10, y son establecidos por metro cúbico de materia prima.

Tabla 10. Costos de residuos forestales por región.

Región	Madera en Pie
Norte	\$523.69
Centro	\$753.59
Sur	\$224.00
Nacional	\$517.52

El costo de la caña de azúcar varía por cada zafra anual, en el periodo 2017/2018 se estableció un precio de 780 por tonelada. Para el año 2019 el costo promedio se ha establecido en 760 pesos (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 2018b).

La caña de azúcar tiene diferente precio según el estado de donde provenga como se muestra en la Tabla 11. Para la obtención del precio por tonelada de bagazo, se realiza una estimación ponderando el costo por estado con respecto al costo promedio nacional.

Tabla 11. Precio por tonelada de caña neta. Elaboración propia a partir de (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 2018a)

Estado	Precio (\$/T)
Promedio nacional	851.01
Campeche	778.61
Chiapas	851.00
Colima	812.34
Jalisco	861.40
Michoacán	827.90
Morelos	988.66
Nayarit	860.08
Oaxaca	832.47
Puebla	895.58
Quintana Roo	773.92
San Luis Potosí	932.19
Sinaloa	738.23
Tabasco	776.48
Tamaulipas	923.34
Veracruz	831.38

El costo de una tonelada de bagazo se establece en \$304.48 pesos (Barrera, Amezcua-Allieri, Estupiñan, Martínez, & Aburto, 2016), tomando el valor actual del dólar (\$19.03 al 19 de Junio de 2019). Ponderando este valor al costo nacional de caña de azúcar se obtienen el costo por estado según la ecuación (17).

$$CTBE = \frac{CTCE \times CNTB}{CNTC} \quad (17)$$

Donde:

CTBE	Costo por tonelada de bagazo por estado
CTCE	Costo por tonelada de caña por estado
CNTB	Costo nacional por tonelada de bagazo
CNTC	Costo nacional por tonelada de caña

De la ecuación anterior se obtienen los valores (Tabla 12) que serán utilizados en el modelo.

Tabla 12. Costo de bagazo por estado. Fuente: elaboración propia

Estado	Precio de bagazo (\$/T)
Promedio nacional	304.48
Campeche	278.58
Chiapas	304.48
Colima	290.64
Jalisco	308.20
Michoacán	296.21
Morelos	353.73
Nayarit	307.73
Oaxaca	297.85
Puebla	320.43
Quintana Roo	276.90
San Luis Potosí	333.53
Sinaloa	264.13
Tabasco	277.81
Tamaulipas	330.36
Veracruz	297.46

Electricidad.

El costo de electricidad según establece la dependencia correspondiente se encuentra dividido en costo fijo y costo variable, donde el costo variable cambia según el horario en el que se consume tal y como se ejemplifica en la Tabla 13 para el estado de Yucatán.

Tabla 13. Costo de electricidad Yucatán. Fuente: CFE

Estado	Horario	Cargo	Unidades	Precio
Yucatán	Fijo	Fijo	\$/Mes	1,537.31
	Base	Variable	\$/kWh	0.9099
	Intermedia	Variable	\$/kWh	1.6205
	Punta	Variable	\$/kWh	1.7389
	Semipunta	Variable	\$/kWh	0.0
	-	Capacidad	\$/kW	345.63

La comisión federal de electricidad ha establecido 8 regiones en México con 3 diferentes clasificaciones de horario tal como se muestra en la Figura 11, por lo que cada estado se encuentra ubicado en una región específica, un ejemplo de esto se puede ver en la

Tabla 14 y Tabla 15 donde se muestran los horarios asignados a la región de Baja California. La información de todas las regiones se encuentra en el Anexo I de la Tabla 30 a la Tabla 37.

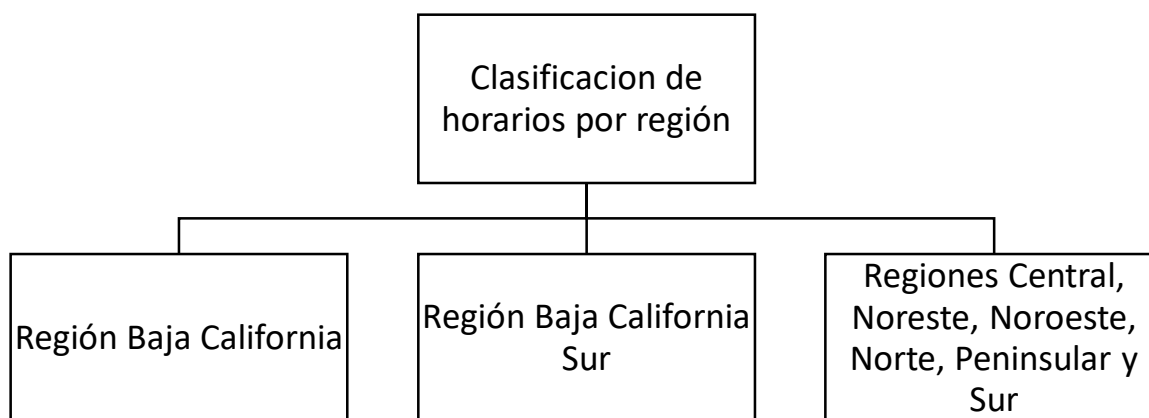


Figura 11. Clasificación de horarios por región.

Tabla 14. Región baja California. Del 1° de Mayo al último domingo de octubre.

Día de la semana	Intermedio	Semipunta	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 13:00 23:00 - 24:00	17:00 - 23:00	13:00 - 17:00
Sábado	0:00 - 24:00	--	--
Domingo y festivo	0:00 - 24:00	--	--

Tabla 15. Región Baja California. Del último domingo de octubre al 30 de abril.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 17:00 22:00 - 24:00	17:00 - 22:00	--
Sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	--
Domingo y festivo	0:00 - 24:00	--	--

Para el presente trabajo se considera una jornada de producción de 8 horas al día durante 6 días por semana, la jornada se establece de 9:00 a 17:00, con base a ello se establecen los costos aproximados por energía eléctrica de la Tabla 38 en el anexo I.

Agua

El costo de uso de agua está clasificado por áreas, es decir, en cada estado puede haber varios precios para el consumo de agua según el área que se le haya asignado. En la Tabla 39 del anexo II se aprecian los costos de las principales ciudades por estado.

Mano de obra

El costo de mano de obra es estimado con base los salarios mínimos establecidos en México a partir de primero de enero del 2019. Lo anterior establece dos zonas con diferentes montos asignados. La zona libre frontera norte incluye municipios ubicados a una distancia máxima de 25km de la zona fronteriza norte y establece un monto de 176.72 pesos como salario mínimo diario. Los municipios pertenecientes a esta zona se encuentran en la Tabla 16. Por otro lado, la zona general de salario mínimo es conformada por el resto de los municipios de la república mexicana, se establece un salario mínimo al día de 102.68 pesos.

Tabla 16. Municipios de la zona libre frontera norte.

Estado	Chihuahua	Nuevo León	Sonora
Municipio	Janos	Anáhuac	San Luis Río Colorado
	Ascensión	Nuevo Laredo	Puerto Peñasco
	Juárez	Guerrero	General Plutarco Elías Calles
	Práxedes G. Guerrero	Mier	Caborca
	Guadalupe	Miguel Alemán	Altar, Sáric
	Coyame del Sotol	Camargo	Nogales
	Ojinaga	Gustavo Díaz Ordaz	Santa Cruz
	Manuel Benavides	Reynosa	Cananea
		Río Bravo	Naco
		Valle Hermoso	Agua Prieta

Estado	Coahuila de Zaragoza	Baja California	Tamaulipas
Municipio	Ocampo	Ensenada	Matamoros
	Acuña	Playas de Rosarito	
	Zaragoza	Mexicali	
	Jiménez	Tecate	
	Piedras Negras	Tijuana	
	Nava		
	Guerrero e Hidalgo		

Producción por tecnología

Los costos de producción de los diferentes procesos de transformación son obtenidos de la bibliografía. El proceso de transesterificación enzimática necesita \$12'778.46 pesos para transformar una tonelada de ACU en biodiesel (Lisboa et al., 2014) a diferencia de la transesterificación ácida la cual necesita \$9'140.53 (Gebremariam & Marchetti, 2018a). Sin embargo, al eliminar los costos de materia prima (los cuales son considerados a parte en el presente estudio) estimados en 80% (Apostolakou, Kookos, Marazioti, & Angelopoulos, 2009) los valores obtenidos son \$2'555.69 y \$1'828.1, mientras la transesterificación alcalina requiere \$3'002.55 (Apostolakou et al., 2009) considerando una reducción del 30% de los sueldos para este último.

El costo del proceso de fermentación para la producción de una tonelada de biocombustible es de \$4157.81 (Haider, Qyyum, Hussain, Yasin, & Lee, 2018). Los procesos de licuefacción, gasificación y pirólisis tienen un costo estimado de \$4048.40, \$3799.20 y \$5255.90 por tonelada respectivamente (Ramirez & Rainey, 2019). Por otra parte, el proceso de mejora hidrotermal necesita \$4675.29 para transformar una tonelada de materia prima (Jiang et al., 2019). La información anterior se encuentra resumida en la Tabla 17

Tabla 17. Costo por tecnología (T).

Proceso	Costo (\$/T de MP)
Transesterificación alcalina	\$3'002.55
Transesterificación enzimática	\$2'555.69
Transesterificación ácida	\$1'828.1
Fermentación	\$4'157.81
Licuefacción	\$4'048.40
Gasificación	\$3'799.20
Pirólisis	\$5'255.90
Mejora hidrotermal	\$4'675.29

Transporte de materia prima

Se incluye información de los costos asociados al transporte de biomasa de la fuente de producción hacia la biorrefinería, éstos incluyen el costo de la renta del vehículo que será usado y adicionalmente el costo del combustible necesario.

- Renta de vehículos de transporte

Se analizan varios tipos de vehículos de transporte disponibles tal y como se muestra en la Figura 12. Sin embargo, los volúmenes a transportar superan 10 mil toneladas a la semana en promedio, por lo que vehículos con capacidad inferior a 15 toneladas son descartados. Lo anterior considerando la reducción de costos por la economía a escala.

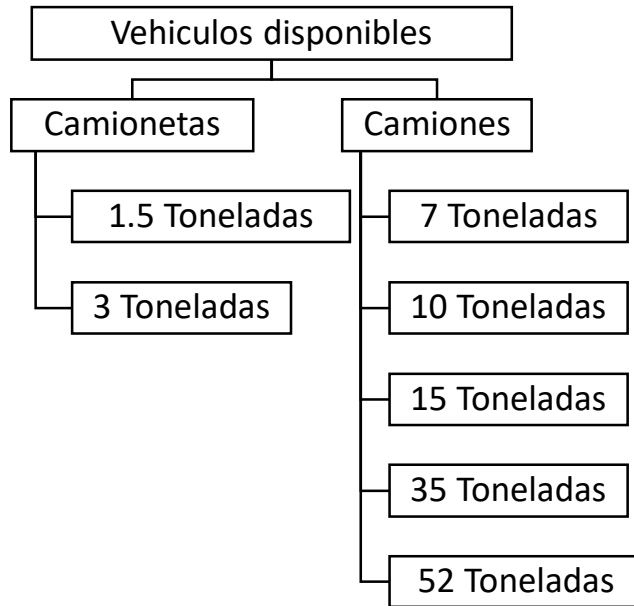


Figura 12. Vehículos de carga disponibles

El ACU tiene el menor volumen de disponibilidad comparado con las otras dos biomásas seleccionadas ya que el promedio se establece en 190.6 toneladas a la semana como se muestra la Tabla 18

Tabla 18. Disponibilidad semanal de ACU

Zona metropolitana	Volumen	Masa (T)	Masa semanal
ZM de Aguascalientes	4'043.5	3'070.7	59.1
ZM de Cuernavaca	4'011.5	3'046.4	58.6
ZM de Guadalajara	19'233.0	14'606.1	280.9
ZM de Juárez	5'777.0	4'387.2	84.4
ZM de la Laguna	5'272.5	4'004.1	77.0
ZM de León	6'980.0	5'300.8	101.9
ZM de Mérida	4'219.5	3'204.4	61.6
ZM del Valle de México	4'062.5	3'085.2	59.3
ZM de Monterrey	17'806.5	13'522.8	260.1
ZM de Puebla-Tlaxcala	11'834.0	8'987.1	172.8
ZM de Querétaro	4'757.5	3'613.0	69.5
ZM de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez	4'512.0	3'426.5	65.9
ZM de Tijuana	7'595.5	5'768.2	110.9
ZM de Toluca	8'396.5	6'376.5	122.6
ZM de Mexicali	87'240.5	66'252.9	1274.1
		Promedio	190.6

Considerando que los valores expresados en la Tabla 18 se encuentran en los rangos inferiores de disponibilidad se establece que las camionetas y los camiones inferiores a 35 toneladas no son de utilidad para el presente estudio por lo que se utilizarán camiones de 52 toneladas siendo variable el número de éstos según la materia disponible por zona.

La cantidad de camiones a utilizar será determinada por el modelo matemático y dependerá directamente del volumen de materia a procesar de tal manera que por cada 50 toneladas de biomasa se considera la renta de un camión. Esto considerando la ocupación del 96% del vehículo. La renta de cada camión se establece en \$5'000⁴⁵ y no incluye el costo por distancia recorrida.

⁴ <http://www.truckrental.com.mx>

⁵ <https://www.idealease.com.mx/>

- Combustible

El costo asociado al recorrido de cada vehículo se encuentra directamente proporcional al área en el que se establece la biorrefinería, y al costo del diésel en dicha región. El precio del diésel por cada estado y zona se muestra en la Tabla 19, los valores presentados son un promedio de costos de gasolineras en la región⁶. Se considera un rendimiento de 2km/L para cada vehículo (Arroyo-Osorno, Aguerrebere-Salido, & Torres-Vargas, 2012).

Tabla 19. Costo de diésel por estado o zona

Lugar	Diésel (\$/L)	Lugar	Diésel (\$/L)
Chiapas	20.66	ZM de Aguascalientes	21.53
Chihuahua	20.87	ZM de Cuernavaca	21.12
Durango	21.36	ZM de Guadalajara	21.34
Guerrero	21.85	ZM de Juárez	18.89
Jalisco	21.34	ZM de la Laguna	21.43
México	21.09	ZM de León	21.49
Michoacán	21.07	ZM de Mérida	20.76
Morelos	21.12	ZM del Valle de México	21.15
Nayarit	21.21	ZM de Monterrey	21.75
Oaxaca	21.65	ZM de Puebla-Tlaxcala	20.58
Puebla	20.39	ZM de Querétaro	21.46
Quintana Roo	21.36	ZM de San Luis Potosí- Soledad	
San Luis Potosí	20.73	de Graciano Sánchez	20.73
Sonora	22.04	ZM de Tijuana	20.31
Tabasco	20.10	ZM de Toluca	21.09
Tamaulipas	21.60	ZM de Mexicali	20.21
Veracruz	20.95		

5.1.3 Potencial energético

Las propiedades de un biocombustible varían según la materia prima utilizada, así como la calidad de ésta y el proceso al cual es sometido para su producción. Si bien

⁶ <http://www.cre.gob.mx/ConsultaPrecios/GasolinasyDiesel/GasolinasyDiesel.html>

los biocombustibles representan grandes ventajas antes los combustibles fósiles tradicionales el poder calorífico que proporcionan es menor.

El biodiesel producido a partir de ACU tiene un poder calorífico de 39.157 MJ/kg mientras el diésel convencional 43.856 MJ/Kg lo que representa un 12% menos (Torres et al., 2015). Considerando el factor de conversión, que varía según el tipo de transesterificación se puede estimar el volumen a producir y el potencial energético.

Para el proceso de transesterificación con catalizadores de base alcalina la tasa de conversión es de 98% (Math et al., 2010). Lo que deja un contenido energético de 38'373.8MJ por tonelada. Sin embargo, si la transesterificación es catalizada por enzimas la tasa de conversión máxima es de 77.87% después de 24 horas (Gharat & Rathod, 2013) lo que proporciona 30491.55MJ/T, por otro lado la transesterificación catalizada por ácido proporciona una tasa de conversión de 91.9% proporcionando un total de 35985.28MJ/T.

En el proceso de fermentación para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, se puede obtener un máximo de 291 litros por tonelada de bagazo húmedo. Sin embargo, al considerar factores de conversión para la glucosa y la xilosa (Margarita, Osney, Antonio, María, & Geraldo, 2015), el volumen final es de 200 litros por tonelada.

El valor del poder calorífico del bioetanol corresponde a 26.9MJ por kilogramo. Sin embargo, por la densidad del producto, este valor se traduce a 21.1MJ por litro, es decir que por tonelada de materia prima se estarían produciendo 4220MJ.

Si la caña de azúcar es procesada para la obtención de biodiesel el volumen de producción se reduce en 32.01% (Huang, Long, & Singh, 2016), por lo que se obtienen 135.9L de biodiesel por tonelada de materia prima procesada, cuyo contenido energético va de 28 a 36 MJ/kg (Ramirez & Rainey, 2019); para el presente estudio se usará el valor promedio (32MJ/Kg) y una densidad de .8746Kg/L lo que representa 118.858Kg de producto con un poder calorífico total de 3803.45MJ/T.

Por otra parte, se puede obtener biocombustible gaseoso de la caña de azúcar mediante el proceso de gasificación. El gas obtenido tiene un poder energético entre 27 y 33MJ/kg. El producto gaseoso representa el 20% de la masa de la materia prima, de la cual el 70% es biocombustible (Ramirez & Rainey, 2019), lo que proporciona 140Kg. El contenido calorífico por tonelada de materia prima procesada es de 4200MJ tomando el valor promedio de la bibliografía (30MJ/kg).

Los residuos forestales pueden ser procesados por diferentes tecnologías, la pirólisis permite transformar una tonelada de materia prima en 170L de biodiesel (Faba, Díaz, & Ordóñez, 2014). Cuyo contenido energético es de 17MJ/Kg (Bridgwater, 2012), lo que proporciona un valor de 2527.59MJ por tonelada de residuos forestales (densidad= 0.8746Kg/L).

Si los residuos forestales se procesan a través de la fermentación se obtienen 132.4Kg de bioetanol por tonelada de materia prima (Song et al., 2019) lo que representa 168.78L. El poder calorífico estimado es de 21.17MJ/L (Mičić & Jotanović, 2015), lo que proporciona un valor total de 3573.07MJ/T.

El proceso de mejora hidrotermal tiene una tasa de conversión de 0.4126 y produce un biocrudo de 33.32MJ/kg (Rackemann et al., 2011) lo que genera 13747.83MJ por tonelada de materia prima.

El poder energético de las diferentes tecnologías contempladas en el trabajo, se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20. Concentrado de poder calorífico según biomasa y tecnología.

Biomasa	Tecnología	Poder Energético (MJ/T)
Aceite de cocina usado	Transesterificación base alcalina	38373.8
	Transesterificación enzimática	30491.55
	Transesterificación ácida	35985.28
Caña de azúcar	Fermentación (Bioetanol)	4220
	Licuefacción (Biodiesel)	3803.45
	Gasificación	4200
Residuos forestales	Pirólisis (Biodiesel)	2527.59
	Fermentación (Bioetanol)	3573.07
	Mejora hidrotermal (Biocrudo)	13747.83

5.2 Modelado

La formulación matemática del modelo se diseña a partir de los objetivos centrales del estudio. A continuación, se establecen las variables del modelo, así como las funciones objetivo con las respectivas restricciones.

5.2.1 Conjuntos de datos

Lugar

El conjunto de lugares i está conformado por los estados y/o zonas de la república mexicana que cuenten con un volumen representativo de materia prima (según el principio de Pareto)

Tecnología

El conjunto de tecnologías j se encuentra conformado por las diferentes tecnologías con las que puede ser procesada un tipo de materia prima para transformarse en diversos biocombustibles.

Materia prima

El conjunto de materias primas k se encuentra conformado por las diferentes materias primas estudiadas en el presente trabajo.

5.2.2 Variables de decisión

Volumen de materia prima

Esta variable hace referencia al volumen de materia prima k a utilizar en el lugar i , está expresada en toneladas y tiene como límite superior el volumen de materia prima disponible en la zona en la que se establece la biorrefinería.

$$x_{ik}$$

Establecimiento de biorrefinería

Es una variable binaria, es decir, solo puede tomar valores de cero o uno. Esta variable hace referencia a la instalación de la biorrefinería en el lugar i seleccionado para procesar la materia prima con la tecnología j

$$y_{ij} \begin{cases} 1 & \text{si se decide establecer la biorrefinería en el lugar } i \text{ con la tecnología } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

5.2.3 Parámetros

Costo de materia prima

Representa el costo una tonelada de materia prima k en el lugar i

$$A_{ik}$$

Costo de mano de obra directa

Este parámetro representa el costo de mano de obra directa de un día en el lugar i

$$B_i$$

Factor de costo de tecnología

Este parámetro figura el costo de la tecnología j utilizada en el lugar i

$$C_{ij}$$

Costo de agua

Parámetro asociado al costo del agua en el lugar i para la tecnología j

$$D_{ij}$$

Costo variable de la electricidad

Parámetro asociado al costo variable de la electricidad en el lugar i para la tecnología j

$$E_{ij}$$

Costo fijo de la electricidad

Parámetro asociado al costo fijo de la electricidad en el lugar i para la tecnología j

$$F_{ij}$$

Aprovechamiento de materia prima

Porcentaje de aprovechamiento de materia prima k para la tecnología j

$$P_{jk}$$

Potencial energético

Cantidad de potencial energético por tonelada de producción de biocombustible según la materia prima k y la tecnología j utilizada

$$Q_{jk}$$

Energía mínima

Cantidad de energía mínima a producir en i

$$L_i$$

Producción mínima

Volumen de producción de biocombustible mínimo a generar en el lugar i

$$S_i$$

Costos Logísticos

Parámetro asociado al costo logístico de la materia prima

$$G_{ik}$$

5.2.4 Función objetivo

Se han establecido dos funciones objetivo para el presente trabajo. El objetivo de la función (18) es minimizar el costo de producción, en ella influyen los costos de materia prima, mano de obra, costo de la tecnología, agua, electricidad y costos logísticos.

$$\text{Min} \left(f(x) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (A_{ik} + B_i + C_{ij} + D_{ij} + E_{ij} + G_{ik}) x_{ik} + F_{ij} \right) \quad (18)$$

Por otra parte, la función objetivo (19) pretende maximizar el potencial energético a producir. Tomando en cuenta el porcentaje de aprovechamiento de la materia prima al utilizar una tecnología específica y el potencial energético del biocombustible generado.

$$\text{Max} \left(f(x) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_{jk} Q_{jk} x_{ik} \right) \quad (19)$$

5.2.5 Restricciones

Volumen mínimo de producción

Se establece un volumen mínimo de producción S para cada lugar i , la aprobación de esta restricción se encuentra directamente proporcional al porcentaje de aprovechamiento de materia prima, así como de su disponibilidad.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_{jk} x_{ik} \geq S_i \quad (20)$$

Plantas de producción

La presente restricción indica como mínimo la instalación de una biorrefinería para la solución del modelo planteado.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij} > 0 \quad (21)$$

Plantas por zona

Se establece como máximo una biorrefinería por zona de una misma materia prima, debido a la capacidad de planta.

$$\sum_{j \in J} y_{ij} \leq 1 \quad (22)$$

Volumen

Restricción de no negatividad

$$x_{ij} \geq 0 \quad (23)$$

Ubicación de planta

Restricción binaria de selección de biorrefinería.

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad (24)$$

Se pueden utilizar otros controles de gestión y operativos para limitar las variaciones. Sin embargo, estos no están dentro del alcance de este estudio

5.3 Resolución teórica del modelo

La resolución teórica del modelo matemático incluye la programación en un software como herramienta para la solución del problema multiobjetivo. Para ello, la información obtenida de la investigación bibliográfica se concentra en dos hojas de datos que se presentan en el Anexo III. Concentrado de valores.

Para la implementación del modelo se sigue el procedimiento mostrado en la Figura 13.

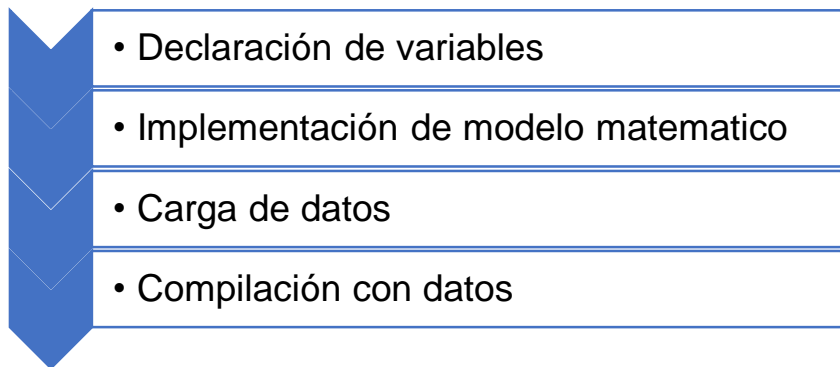


Figura 13. Implementación en software.

- Declaración de variables

La primera etapa de la implementación es crear un archivo .mod en el que se declaran las variables del modelo. A continuación, se presenta en la Tabla 21 los nombres asignados en el software a las variables del modelo matemático.

Tabla 21. Relación de variables

Nombre	Variable del modelo matemático
LUGARMP	Conjunto i
TECNO	Conjunto j
volIMP	Volumen de materia prima disponible en el lugar
volFacAprov	P_{jk}
volPotEnerg	Q_{jk}
costMP	A_{ik}
costMObra	B_i
costFacTec	C_{ij}
costAgua	D_{ij}
costElectVar	E_{ij}
costElecFijo	F_{ij}

La declaración de las variables se puede ver en la Figura 14. Las variables se encuentran en función de conjunto de datos. Para el presente estudio se utilizaron dos conjuntos. LUGARMP es el conjunto de lugares con su respectivo tipo de materia prima, mientras TECNO es el conjunto de tecnologías que serán evaluadas. Posteriormente se declaran los parámetros asignados a un lugar específico, dichos parámetros son de control, para restricciones diseñadas por el uso del método de restricciones épsilon.

Se declaran los parámetros asociados a los costos y posteriormente los parámetros relacionados con los volúmenes de cada materia prima. Finalmente son declaradas las variables de decisión X_{vol} y Y_{select} . Las líneas de código que empiezan con el símbolo # son considerados comentarios, por lo que son de índole explicativa y no tienen repercusión en el código.


```

#Grupo de datos a trabajar
set LUGARMP; #I
set TECNO; #J

*****
#Parametros de la tabla lugar
param MP {i in LUGARMP} >= 0;
param CostMaxInv {i in LUGARMP} >= 0;
param cont {j in TECNO} >= 0;
param VolMinProducc {i in LUGARMP} >= 0;
*****

*****
#Parametros de costos para la funcion objetivo 1. Minimizar Costo
param costMP {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param costMObra {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param costFacTec {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param costAgua {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param costElecFijo {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param costElecVar {LUGARMP,TECNO} >= 0;
*****

*****
#Parametros de costos para la funcion objetivo 2 Maximizar Potencial Energetico
param volMP {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param volFacAprov {LUGARMP,TECNO} >= 0;
param volPotEnerg {LUGARMP,TECNO} >= 0;
*****

*****
#Variables de Decision
var Xvol {LUGARMP,TECNO} >=0 ;
var Yselect {LUGARMP,TECNO} binary ;
*****

```

Figura 14. Declaración de variables

- Implementación de modelo

Una vez declaradas las variables y parámetros, se procede con la metodología de resolución propuesta, para ello se realizan 3 scripts del modelo tal como se describe a continuación.

1. Se diseña el script de maximización de potencial energético (ver Figura 15), sin restricciones asociadas a costos. La finalidad del script es generar una

coordenada de referencia en el que se obtiene el potencial energético óptimo a producir.

```
#####  
#####Funcion Objetivo#####  
#1. Maximizar Potencial Energetico  
maximize Maxim_Pote: sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} volFacAprov[i, j]*  
                    volPotEnergi[i, j]*Xvol[i, j];  
  
#####Restricciones#####  
  
# 1. Control de MP por zona  
subject to MAXMPrules {i in LUGARMP}:  
sum {j in TECNO} Xvol[i, j] <= MP[i];  
  
# 2. Controlar numero de plantas Nacional  
subject to LimitePlantas:  
sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} Yselect[i, j] <= 10;  
  
# 3. Prueba Activacion Y en F.O.  
subject to ActivacionY {i in LUGARMP, j in TECNO}:  
Xvol[i, j] <= VolMaxProducc[i]*Yselect[i, j];
```

Figura 15. Maximización de potencial energético

2. Se diseña el script de minimización de costos (ver Figura 16), sin restricciones asociados al potencial energético. La finalidad del script es generar una coordenada de referencia en el que se obtiene los costos mínimos de funcionamiento.

```

*****
*****Funcion Objetivo*****

#2. Minimizar Costo
minimize Minim_Cost: sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} ((costMP[i, j]+costMObra[i, j]+
costFacTec[i, j]+costAgua[i, j]+
costElecVar[i, j] + totalTransporte[i, j])*Xvol[i,j]
+ costElecFijo[i, j]*Yselect[i, j]);

*****Restricciones*****

# 1. Control de MP por zona
subject to MAXMPrules {i in LUGARMP}:
sum {j in TECNO} Xvol[i,j] <= MP[i];

# 3. Controlar numero de plantas Nacional
subject to LimitePlantas:
sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} Yselect[i,j] >= 10;

# 3. Prueba Activacion Y en F.O.
subject to ActivacionY {i in LUGARMP, j in TECNO}:
Xvol[i,j] >= VolMaxProducc[i]*Yselect[i,j];

```

Figura 16. Minimización de costos

3. Con las coordenadas obtenidas de los anteriores scripts se generan los parámetros de referencia para la implementación de la metodología epsilon constraint, dicho parámetro de referencia se puede ver en la restricción 4 de la Figura 17 nombrado LimMaxPot.

```

*****
*****Funcion Objetivo*****

#2. Minimizar Costo
minimize Minim_Cost: sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} ((costMP[i, j]+costMObra[i, j]+
costFacTec[i, j]+costAgua[i, j]+
costElecVar[i, j]+ totalTransporte[i, j])*(Xvol[i,j]) +
costElecFijo[i, j]*Yselect[i, j]);

*****Restricciones*****

# 1. Control de MP por zona
subject to MAXMPrules {i in LUGARMP}:
sum {j in TECNO} Xvol[i,j] <= .9*MP[i];

# 2. Controlar número de planta por zona
subject to PlantEstado {i in LUGARMP}:
sum {j in TECNO} Yselect[i,j] <=1;

# 3. Controlar número de plantas Nacional
subject to LimitePlantas:
sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} Yselect[i,j] = 10;

#4. Condición de activacion Y en F.O. (.30 de MP como uso minimo)
subject to ActivacionY {i in LUGARMP, j in TECNO}:
Xvol[i,j] >= .333*VolMaxProducc[i]*Yselect[i,j];

#5. Condición de activacion Y en F.O. (.9 de MP como uso maximo)
subject to ActivacionYx {i in LUGARMP, j in TECNO}:
Xvol[i,j] <= VolMaxProducc[i]*Yselect[i,j];

#6. Condicion epsilon de control de Potencial a producir
subject to RestriccionEpsilon:
sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO} (volFacAprov[i, j]*volPotEnerg[i, j]*Xvol[i,j]) >= LimMaxPot;

```

Figura 17. Epsilon constraint

- Carga de datos

Realizada la implementación del modelo, se procede a la carga de datos, para ello se diseña un archivo .run en el que se incluye el archivo .mod anteriormente creado y posteriormente se implementan los comandos para la carga de datos provenientes de las hojas de datos tal y como se muestra en la Figura 18. El código incluye comandos para guardar los valores obtenidos en un libro de Excel.

```

model ModelEpsilon.mod;
table Lugaresmp IN "ODBC" "EstadosMPF.xls":
LUGARMP <- [LUGARMP], MP, CostMaxInv, VolMaxProducc;
read table Lugaresmp;

table Tecnos IN "ODBC" "TecnologiasF.xls":
TECNO <- [TECNO], cont;
read table Tecnos;

table Costos IN "ODBC" "CostosTotalesFFF.xls": [LUGARMP, TECNO], costMP,
costMObra, costFacTec, costElecFijo, costElecVar, costAgua, totalTransporte ;
read table Costos;

table Volumenes IN "ODBC" "VolumenesTotalesF.xls": [LUGARMP, TECNO], volMP,
volFacAprov, volPotEnerg;
read table Volumenes;

table REpsilon IN "ODBC" "02EpsilonV02.xls":
auxCont <- [auxCont], optimalcostmin, maxpotmin2;
read table REpsilon;

repeat while LimMaxPot < 105000000001 {

objective Minim_Cost;
option solver cplex;
solve;

let optimalcostmin[auxcontador] := Minim_Cost;
let maxpotmin2[auxcontador] := sum {i in LUGARMP} sum {j in TECNO}
(volFacAprov[i, j]*volPotEnerg[i, j]*(Xvol[i,j]));

let LimMaxPot := LimMaxPot + 5000000000;
let auxcontador := auxcontador+1;

}

table results3 "ODBC" "02EpsilonV02Results.xls":
[auxCont] optimalcostmin OUT, maxpotmin2 OUT;
write table results3;

display optimalcostmin, maxpotmin2;

```

Figura 18. Scrip .run de épsilon constraint

Los datos obtenidos del programa son graficados para obtener la frontera de pareto (ver Figura 19).

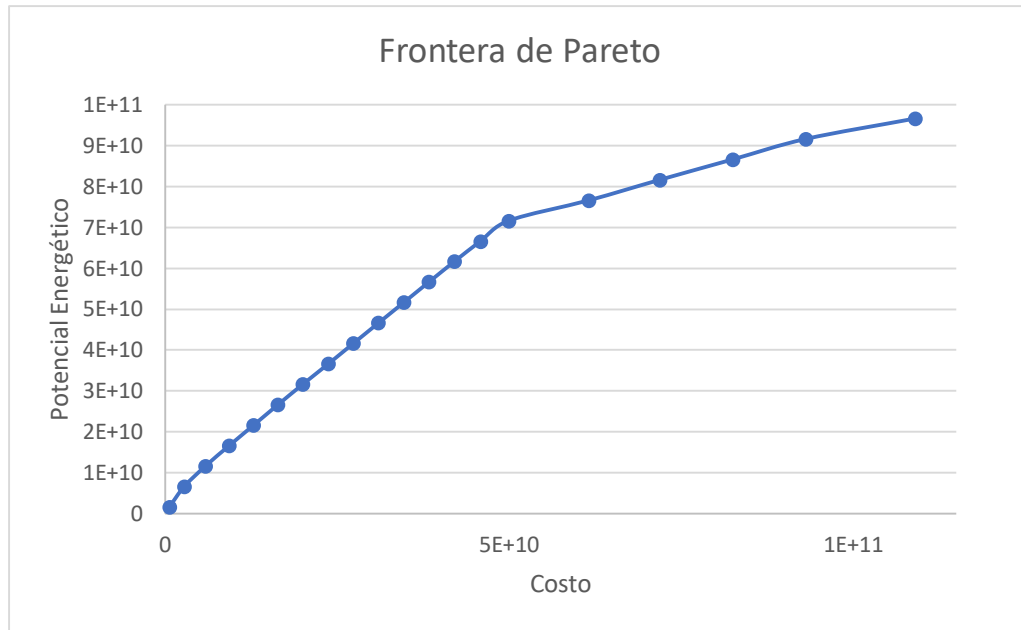


Figura 19. Frontera de Pareto

Capítulo VI. DISCUSIÓN

La metodología propuesta provee un conjunto de soluciones óptimas en la denominada frontera de Pareto. Si bien el estudio arroja resultados viables es indispensable resaltar la falta de inclusion de variables para hacer del modelo una representacion más realista

6.1 Casos de discusión

Considerando los resultados obtenidos en el capítulo anterior se establecen tres casos de discusión representados por las letras A, B y C en la Figura 20.

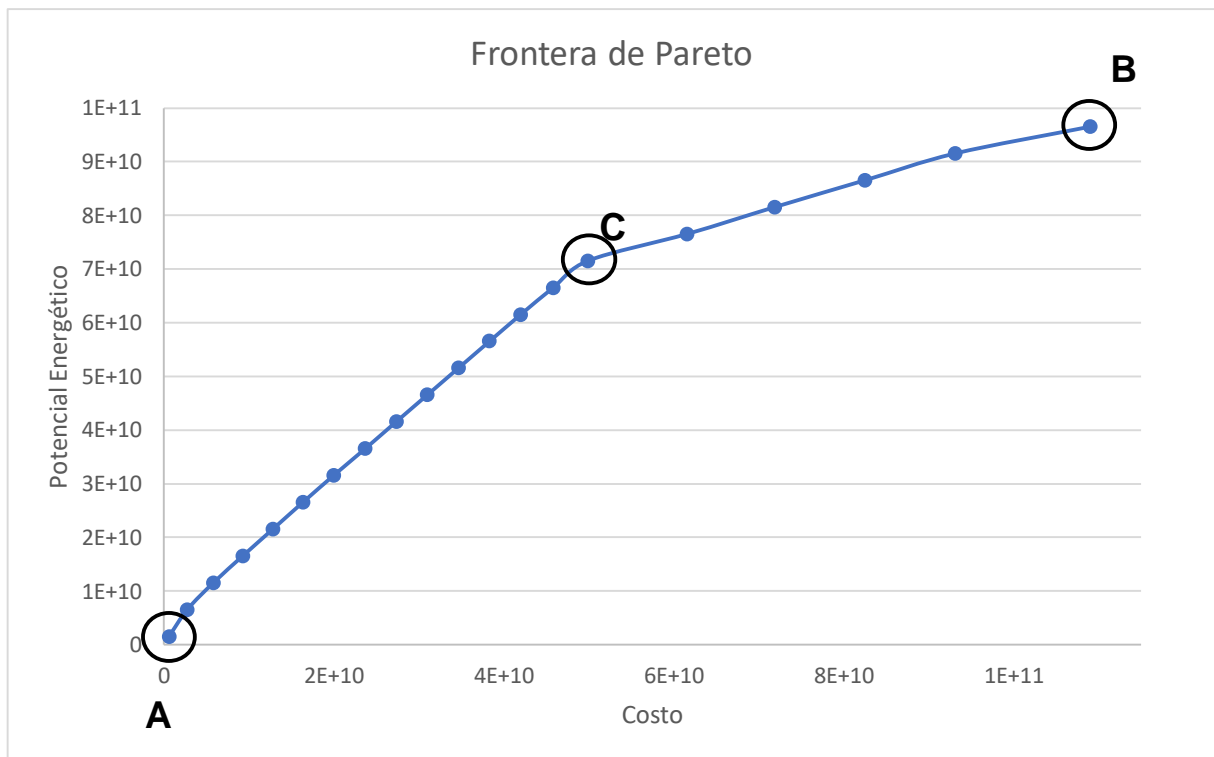


Figura 20. Casos de discusión

Caso de discusión 1

El punto A de la Figura 20 estudia la situación en la que se minimiza el costo de producción sin importar el potencial energético a producir. La configuración de

biorrefinerías resultante del modelo de optimización se muestra en la Tabla 22, en ella destacan zonas metropolitanas para el procesamiento de ACU utilizando la tecnología 3, es decir la transesterificación ácida.

Tabla 22. Conjunto de soluciones del caso 1

	T1	T2	T3
ZCUEACU	0	0	1
ZGUAACU	0	0	1
ZJUAACU	0	0	1
ZLEOACU	0	0	1
ZMERACU	0	0	1
ZMEXACU	0	0	1
ZMONACU	0	0	1
ZPUEACU	0	0	1
ZQUEACU	0	0	1
ZTIJACU	0	0	1

Algunas zonas metropolitanas se encuentran conformadas por más de un estado de la república mexicana, por esta razón, el estado predominante de las zonas metropolitanas seleccionadas se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Lugares seleccionados. Caso 1.

Lugar	Estado predominante
Zona metropolitana de Cuernavaca	Morelos
Zona metropolitana de Guadalajara	Jalisco
Zona metropolitana de Juárez	Chihuahua
Zona metropolitana de León	Guanajuato
Zona metropolitana de Mérida	Yucatán
Zona metropolitana de Mexicali	Baja california
Zona metropolitana de Monterrey	Nuevo León
Zona metropolitana de Puebla	Puebla
Zona metropolitana de Querétaro	Querétaro
Zona metropolitana de Tijuana	Baja california

La distribución geográfica de las biorrefinerías se puede ver en la Figura 21, en ella se aprecia una agrupación importante de biorrefinerías en el centro del país, si bien el modelo de optimización establece la utilización de ACU se debe destacar que las zonas metropolitanas seleccionadas son las más pobladas.



Figura 21. Distribución de biorrefinerías. Caso 1.

Caso de discusión 2

El punto B de la Figura 20 estudia la situación en la que se maximiza el potencial energético a producir, sin importar los costos asociados. La configuración de biorrefinerías resultante del modelo de optimización se muestra en la Tabla 24, en ella destacan los estados con mayor disponibilidad de residuos forestales siendo siete los estados seleccionados de los diez que incluye la solución. Por otra parte, se incluyen dos biorrefinerías cuya materia prima es la caña de azúcar y tan solo una zona metropolitana para el aprovechamiento del ACU.

Tabla 24. Conjunto de soluciones del caso 2

	T1	T2	T3
CHHRF	0	0	1
DURRF	0	0	1
JALCA	0	0	1
JALRF	0	0	1
MICRF	0	0	1
OAXRF	0	0	1
PUERF	0	0	1
VERCA	0	0	1
VERRF	0	0	1
ZVMEACU	1	0	0

La distribución geográfica obtenida del caso 2 se puede observar en la Figura 22 (las leyendas se encuentran en la Tabla 25), las biomásas usadas cambian notablemente si se comparan con los resultados del caso 1, en el que el uso de ACU era superior. En el presente caso, destaca en el conjunto de soluciones la zona metropolitana del Valle de México ya que es la única biorrefinería de procesamiento de ACU, la cual no se encuentra viable en el caso 1.

Tabla 25. Leyendas de biorrefinerías según tipo de biomasa.




Leyenda	Biomasa
	ACU
	Bagazo de caña
	Residuos forestales



Figura 22. Distribución de biorrefinerías. Caso 2.

Caso de discusión 3

El punto C de la Figura 20 estudia la situación en la que existe un balance entre el potencial energético a producir y el costo asociado a dicha producción. La configuración de biorrefinerías resultante del modelo de optimización se muestra en la Tabla 26. El impacto que tiene el uso de los residuos forestales como materia prima es muy superior al de las otras biomásas (ACU y caña de azúcar). El conjunto de biorrefinerías obtenido en el punto C de la frontera de Pareto, establece nueve biorrefinerías cuya materia prima son los residuos forestales y una de ACU.

Tabla 26. Conjunto de soluciones del caso 3

	T1	T2	T3
CHHRF	0	0	1
DURRF	0	0	1
GRORF	0	0	1
JALRF	0	0	1
MICRF	0	0	1
OAXRF	0	0	1
PUERF	0	0	1
SONRF	0	0	1
VERRF	0	0	1
ZVMEACU	1	0	0

La distribución de biorrefinerías obtenida del caso 3 se puede observar en la Figura 23 (las leyendas se encuentran en la Tabla 25), es notoria la similitud con los resultados del caso 2. Se aprecia que ingresan dos biorrefinerías de residuos forestales al conjunto de soluciones y son excluidas las únicas dos opciones que incluían caña de azúcar. Esto indica un elevado costo para el procesamiento del bagazo de caña de azúcar, que se ve fácilmente remplazado por el uso de los residuos forestales.



Figura 23. Distribución de biorrefinerías. Caso 3.

6.2 Biorrefinerías por tipo de biomasa

- Residuos forestales

Resulta viable el procesamiento de residuos forestales en los estados mostrados en la Tabla 27, en la cual se puede ver la demanda de materia prima en toneladas. La tecnología de procesamiento es mediante la mejora hidrotermal con la finalidad de producir biodiesel. Los estados presentados en la Tabla 27 son obtenidos de los 3 casos estudiados previamente.

Tabla 27. Biorrefinerías de residuos forestales

Estado	Demanda de MP (T)
Chihuahua	796011
Durango	2121230
Guerrero	93110.9
Jalisco	308029
Michoacán	402730
Oaxaca	354316
Puebla	262564
Sonora	180687
Veracruz	470255

Caña de azúcar

Resulta viable el procesamiento de caña de azúcar en los estados mostrados en la Tabla 28 mediante la gasificación con la finalidad de producir biodiesel. Dichos estados son parte del conjunto de resultados del caso 2. El uso del bagazo de caña de azúcar en el caso 2, demuestra la utilidad de dicha biomasa cuando se desea priorizar el volumen de producción ya que en caso de requerir menores volúmenes se puede cubrir la demanda con el uso de residuos forestales, lo que resulta con mayor viabilidad en cuanto a costos.

Tabla 28. Biorrefinerías de caña de azúcar.

Estado	Demanda de MP (T)
Jalisco	1222660
Veracruz	5625940

ACU

Según el resultado obtenido (Tabla 29) se establece que el procesamiento de ACU es viable cuando se desea costos mínimos sacrificando el potencial energético a producir. Si bien el procesamiento de ACU cuenta con costos operativos bajos, el volumen de materia prima disponible también lo es, por lo que no resulta una producción industrial para una biorrefinería. La producción de biocombustible mediante ACU únicamente satisface pequeñas demandas energéticas.

Tabla 29. Biorrefinerías de ACU

Estado	Demanda de MP (T)
ZCUEACU	1202.25
ZGUAACU	5764.13
ZJUAACU	1731.37
ZLEOACU	2091.91
ZMERACU	1264.58
ZMEXACU	3656.25
ZMONACU	9839.76
ZPUEACU	10650.60
ZQUEACU	1425.82
ZTIJACU	6835.95
ZVMEACU	78516.40

6.3 Generalidades del modelo

La principal limitante del modelo diseñado radica en los parámetros asociados a los costos logísticos, ya que estos no se incluyen en toda la cadena de suministro, así mismo, dichos parámetros se restringen únicamente al traslado de biomasa, lo que genera sesgo en el comportamiento de la función de costos. Si bien se consideró de manera importante la disponibilidad de la materia prima cerca de las ubicaciones, esto no compensa la gran importancia que tienen los costos logísticos.

Capítulo VII. CONCLUSIONES

Las biomásas estudiadas en el presente trabajado destacan por ser de segunda generación, esto indica un bajo o nulo impacto en el sector alimenticio. El bagazo de la caña de azúcar y los residuos forestales son seleccionados como biomasa debido a los altos volúmenes de producción que se tienen en el país. El ACU es seleccionado debido al impacto ambiental que genera al ser considerado desecho.

El modelo de optimización multiobjetivo es conformado por una función objetivo de minimización de costos y una segunda para maximización de potencial energético.

Los parámetros de la función objetivo para la maximización de potencial energético son la tasa de aprovechamiento de la tecnología y el potencial energético por tonelada de biocombustible producido. Por otra parte, la función objetivo para la minimización de costos incluye los costos asociados a la adquisición de la materia prima, los costos de la tecnología de procesamiento, así como los costos de agua y electricidad. Se incluye el costo de mano de obra el cual es directamente proporcional a la capacidad de producción, así como los costos logísticos para el traslado de materia prima a la ubicación de la biorrefinería.

El conjunto de lugares del modelo es seleccionado según el porcentaje de contribución que el estado o zona tiene respecto al total nacional de la biomasa en cuestión, siendo incluidos los que forman el 80% de dicho total. En el presente estudio se incluyeron 12 estados para caña de azúcar, 10 estados para residuos forestales y 15 zonas metropolitanas para el ACU.

Para la acotación del problema se diseñaron restricciones de volumen de producción, así como número máximo de biorrefinerías en una misma área, restricciones de costos operativos y restricciones de correlación entre variables de decisión.

La resolución teórica del modelo proporcionó un conjunto de soluciones óptimas a lo largo de la frontera de Pareto, de las cuales se puede concluir lo siguiente:

- El ACU es viable en el sector bioenergético cuando se desea minimizar los costos de producción sin importar cuanto potencial energético se produzca.
- Los residuos forestales destacan cuando se busca maximizar el potencial energético a producir sin importar los costos de producción asociados.

De los casos de estudio vistos en la sección 6.1 se establece la superioridad de los residuos forestales para el uso en biorrefinerías, ya que el uso de esta biomasa se encuentra en gran parte de los resultados a lo largo de la frontera de Pareto. Por otro lado, a pesar que se cuenta con una gran producción de bagazo de caña de azúcar, ésta es menos viable si se compara con los residuos forestales.

La solución con un balance entre las funciones objetivo se encuentra en el punto C de la Figura 20. El conjunto de soluciones del punto C solo tiene dos elementos distintos al conjunto de soluciones asociadas al punto B (ver Tabla 24 y Tabla 26), lo que indica que son esos dos elementos los que incrementan grandemente el costo de producción proporcionando un pequeño incremento en el potencial energético a producir.

México tiene gran variedad de biomasa que puede ser usada para la producción de biocombustibles, los altos volúmenes producidos los hacen viables para el establecimiento de biorrefinerías. Es necesario realizar un análisis más detallado en el que se incluyan más tipos de biomasa, así como todos los costos logísticos asociados. Sin embargo, se puede concluir que México cuenta con los elementos necesarios para el desarrollo del sector bioenergético.

Capítulo VIII. REFERENCIAS

- Aguilar-Rivera, N., Algara-Siller, M., Olvera-Vargas, L. A., & Michel-Cuello, C. (2018). Land management in Mexican sugarcane crop fields. *Land Use Policy*, 78(August 2016), 763–780. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.034>
- Amini, Z., Ilham, Z., Ong, H. C., Mazaheri, H., & Chen, W. H. (2017). State of the art and prospective of lipase-catalyzed transesterification reaction for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 141, 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.049>
- Apostolakou, A. A., Kookos, I. K., Marazioti, C., & Angelopoulos, K. C. (2009). Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 1023–1031. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.017>
- Archer, S. A., & Steinberger-Wilckens, R. (2018). Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23178–23192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.161>
- Arroyo-Osorno, J. A., Aguerrebere-Salido, R., & Torres-Vargas, G. (2012). COSTOS DE OPERACIÓN BASE DE LOS VEHÍCULOS REPRESENTATIVOS DEL TRANSPORTE INTERURBANO 2012. *SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES*, (368).
- Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques*, 24, 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Barrera, I., Amezcua-Allieri, M. A., Estupiñan, L., Martínez, T., & Aburto, J. (2016). Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasses. *Chemical Engineering Research and Design*, 7, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.015>
- Basu, P. (2013). Biomass Characteristics. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and*

Torrefaction (2nd ed., pp. 49–91). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0/00003-0>

Bharathiraja, B., Sudharsanaa, T., Bharghavi, A., Jayamuthunagai, J., & Praveenkumar, R. (2016). Biohydrogen and Biogas – An overview on feedstocks and enhancement process. *Fuel*, 185, 810–828. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.030>

Bonechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Agnese, M., Tamasi, G., & Rossi, C. (2017). Biomass: An overview. In F. Dalena, A. Basile, & C. Rossi (Eds.), *Bioenergy Systems for the Future* (1st ed., pp. 3–42). Elsevier.

Bowling, I. M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2011). Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(10), 6276–6286. <https://doi.org/10.1021/ie101921y>

Bracmort, K., & Gorte, R. W. (2012). *Biomass: Comparison of Definitions in Legislation Through the 111 th Congress*.

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Cerdá Tena, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos Económicos de ICE*, (83), 117–140. <https://doi.org/10.1109/ICDRET.2014.6861689>

Chikani Cabrera, K. D. (2018). *Evaluación técnica y ambiental de la producción de biodiesel en México*. Universidad Autónoma de Yucatán.

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2018a). *5to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México*. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/392732/Nacional_y_Entidad_Federativa.pdf

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2018b).

Aumenta 40% precio de caña. Retrieved May 29, 2019, from CONADESUCA website: <https://www.gob.mx/conadesuca/prensa/aumenta-40-precio-de-cana?idiom=es>

Comunicado de prensa Semarnat. (2014). México posee 31 millones de hectáreas de bosques tropicales. Retrieved from <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-posee-31-millones-de-hectareas-de-bosques-tropicales-9977>

CONAFOR. (2016). Precios de productos forestales maderables. In *SEMARNAT*.

Corsano, G., Vecchiotti, A. R., & Montagna, J. M. (2011). Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model. *Computers and Chemical Engineering*, 35(8), 1384–1398. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.008>

de Araujo Guilherme, A., Dantas, P. V. F., Padilha, C. E. de A., dos Santos, E. S., & de Macedo, G. R. (2019). Ethanol production from sugarcane bagasse: Use of different fermentation strategies to enhance an environmental-friendly process. *Journal of Environmental Management*, 234(December 2018), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.102>

Demirel, Y. (2018). *Comprehensive Energy Systems* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00125-5>

Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>

Donato, N., & Beltrán, R. (2004). *Análisis teórico de los diferentes procesos para la obtención de etanol a partir de maíz*. 450(1).

Duarte, A. E. (2015). *Metodología para la localización de instalaciones de producción de biocombustibles con enfoque de cadenas de suministro. Aplicaciones en el contexto colombiano*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/50822/>

- Dweiri, F., Ahmed, S., & Almulla, A. (2018). A multi-criteria decision support system to rank sustainable desalination plant location criteria. *Desalination*, *444*(July), 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.007>
- Ehsan, M., & Chowdhury, M. T. H. (2015). Production of biodiesel using alkaline based catalysts from waste cooking oil: A case study. *Procedia Engineering*, *105*(Ictc 2014), 638–645. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.042>
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). From biomass to second generation biofuels. *Madera y Bosques*, *20*(3), 11–24. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n3/v20n3a2.pdf>
- FAO. (2010). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales. Informe nacional. México. *Informe Nacional de México. FRA 2010*, 85. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/013/al567S/al567S.pdf>
- Fourer, D., Gay, D. M., & Kenirghan, B. W. (2003). Diet and Other Input Models: Minimizing Costs. In *AMPL: A MODELING LANGUAGE FOR MATHEMATICAL PROGRAMMING* (2nd ed., pp. 27–42). Canada.
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018a). Biodiesel production through sulfuric acid catalyzed transesterification of acidic oil: Techno economic feasibility of different process alternatives. *Energy Conversion and Management*, *174*(June), 639–648. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.078>
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018b). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, *168*(February), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>
- Ghadimi, A. A., Razavi, F., & Mohammadian, B. (2011). Determining optimum location and capacity for micro hydropower plants in Lorestan province in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(8), 4125–4131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.003>
- Gharat, N., & Rathod, V. K. (2013). Enzyme catalyzed transesterification of waste

cooking oil with dimethyl carbonate. *Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 20(3), 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.10.011>

Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>

Giraldo Ramírez, D. P., Arango Aramburo, S., & Martínez Jaramillo, J. E. (2014). Efectos de los Biocombustibles en la Seguridad Alimentaria en Colombia: Una Aproximación Sistémica. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 7375–7385. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n2.44180>

Gobierno de la Republica. (2014). Reforma Energética. *Gobierno de La Republica*, XXXIII(2), 81–87. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Gomez Flores, R., Nambi, T., Nicol, R., Gilroyed, B., Morrison, M., Reid, L. M., & Margaritis, A. (2017a). Biomass and Bioenergy Bioethanol and biobutanol production from sugarcorn juice. *Biomass and Bioenergy*, (March), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.038>

Gomez Flores, R., Nambi, T., Nicol, R., Gilroyed, B., Morrison, M., Reid, L. M., & Margaritis, A. (2017b). Biomass and Bioenergy Bioethanol and biobutanol production from sugarcorn juice. *Biomass and Bioenergy*, (March), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.038>

Haider, J., Qyyum, M. A., Hussain, A., Yasin, M., & Lee, M. (2018). Techno-economic analysis of various process schemes for the production of fuel grade 2,3-butanediol from fermentation broth. *Biochemical Engineering Journal*, 140(September), 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.09.002>

Hanif, I. (2018). Impact of fossil fuels energy consumption , energy policies , and urban sprawl on carbon emissions in East Asia and the Pacific: A panel investigation. *Energy Strategy Reviews*, 21(November 2017), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.04.006>

Hasan, M. M., & Rahman, M. M. (2017). Performance and emission characteristics

- of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(March), 938–948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.045>
- Herbes, C., Halbherr, V., & Braun, L. (2018). Factors influencing prices for heat from biogas plants. *Applied Energy*, 221(March), 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.188>
- Huang, H., Long, S., & Singh, V. (2016). Techno-economic analysis of biodiesel and ethanol co-production from lipid-producing sugarcane. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 299–315. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Hussain, M. N., Samad, T. Al, & Janajreh, I. (2016). Economic feasibility of biodiesel production from waste cooking oil in the UAE. *Sustainable Cities and Society*, 26, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.010>
- Ibrahim, M. F., Kim, S. W., & Abd-aziz, S. (2018). Advanced bioprocessing strategies for biobutanol production from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91(March 2017), 1192–1204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.060>
- INEGI. (2014). Mapa Digital de México. Retrieved from <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmN1c3Y2>
- International Energy Agency. (2007). Biomass for Power Generation and CHP. *High Temperature*, 1–4. Retrieved from www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm
- Jiang, Y., Jones, S. B., Zhu, Y., Snowden-Swan, L., Schmidt, A. J., Billing, J. M., & Anderson, D. (2019). Techno-economic uncertainty quantification of algal-derived biocrude via hydrothermal liquefaction. *Algal Research*, 39(September 2018), 101450. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101450>
- Jornada, D., & Leon, V. J. (2016). Robustness methodology to aid multiobjective decision making in the electricity generation capacity expansion problem to

- minimize cost and water withdrawal. *Applied Energy*, 162, 1089–1108.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.157>
- Lisboa, P., Rodrigues, A. R., Martín, J. L., Simões, P., Barreiros, S., & Paiva, A. (2014). Economic analysis of a plant for biodiesel production from waste cooking oil via enzymatic transesterification using supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, 85, 31–40.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.10.018>
- López-Díaz, D. C., Lira-Barragán, L. F., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2017). Optimal location of biorefineries considering sustainable integration with the environment. *Renewable Energy*, 100, 65–77.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.028>
- Manish, S., & Banerjee, R. (2008). Comparison of biohydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(1), 279–286.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.026>
- Marchetti, J. M., Miguel, V. U., & Errazu, A. F. (2007). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1300–1311.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.006>
- Margarita, Z.-D. C. L., Osney, P.-O., Antonio, R.-R. P., María, Z.-D. C. B., & Geraldo, L. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.001>
- Marin Pons & Asociados. (2012). Produccion de etanol a partir de caña de azucar. *Ingeniería Ambiental Industrial, Agroindustrial y Agropecuaria*, 1, 26. Retrieved from <http://marinponsasociados.com/PDFMEDIOAMBIENTE/bioetanol.pdf>
- Martínez-Guido, S. I., Ríos-Badrán, I. M., Gutiérrez-Antonio, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy*, 130, 622–632.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.084>

- Math, M. C., Kumar, S. P., & Chetty, S. V. (2010). Technologies for biodiesel production from used cooking oil - A review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.08.001>
- Mićić, V., & Jotanović, M. (2015). Bioethanol as fuel for internal combustion engines. *Zastita Materijala*, 56(4), 403–408. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1504403M>
- Minteer, S. D. (2011). Biochemical production of other bioalcohols: biomethanol, biopropanol, bioglycerol, and bioethylene glycol. In *Handbook of biofuels production*. <https://doi.org/10.1533/9780857090492.2.258>
- Mohammadshirazi, A., Akram, A., Rafiee, S., & Bagheri Kalhor, E. (2014). Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.067>
- Moncada B, J., Aristizábal M, V., & Cardona A, C. A. (2016). Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>
- Montesillo-Cedillo, J. L. (2017). Rendimiento por hectárea de sorgo grano y de frijol en México: riego vs temporal. *Economía Informa*, 403, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2017.05.006>
- Murillo-Alvarado, P. E., Guillén-Gosálbez, G., Ponce-Ortega, J. M., Castro-Montoya, A. J., Serna-González, M., & Jiménez, L. (2015). Multi-objective optimization of the supply chain of biofuels from residues of the tequila industry in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 108, 422–441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.052>
- Nguyen, T. L. T., & Gheewala, S. H. (2008). Life cycle assessment of fuel ethanol from cane molasses in Thailand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(4), 301–311. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0011-2>
- O'Connell, A., Kousoulidou, M., Lonza, L., & Weindorf, W. (2019). Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(November 2017), 504–515.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.033>
- Oliveira, J., Almeida, M. F., Alvim, M. C., & Dias, J. M. (2017). Integrated production of biodiesel and bioetanol from sweet potato. *Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.052>
- Palmeros Parada, M., Osseweijer, P., & Posada Duque, J. A. (2017). Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Industrial Crops and Products*, 106, 105–123.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>
- Rackemann, D. W., Moghaddam, L., Rainey, T. J., Fellows, C. F., Hobson, P. A., & Doherty, W. O. S. (2011). Hydrothermal Technologies for the Production of Fuels and Chemicals from Biomass. In R. Sanghi & V. Singh (Eds.), *Green Chemistry for Environmental Remediation* (pp. 291–342).
<https://doi.org/10.1002/9781118287705>
- Ramirez, J. A., & Rainey, T. J. (2019). Comparative techno-economic analysis of biofuel production through gasification, thermal liquefaction and pyrolysis of sugarcane bagasse. *Journal of Cleaner Production*, 229, 513–527.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.017>
- Ramos, A., Sanchez, P., Ferrer, J. M., Barquin, J., & Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. *Technical Report*, 4–5.
- Rodionova, M. V., Poudyal, R. S., Tiwari, I., Voloshin, R. A., Zharmukhamedov, S. K., Nam, H. G., ... Allakhverdiev, S. I. (2017). Biofuel production: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8450–8461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.125>
- Rosa, E. O. (2016). Bioethanol production process rheology. *Industrial Crops & Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.051>
- SAGARPA. (2017). Caña de Azúcar Mexicana. *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*, 1(1), 1–14.

- Schwarz, M. (2017). Impacto de los costos logísticos en la competitividad de las cadenas de suministro agroexportadoras peruanas en el contexto del TLC Perú-EE.UU al 2015. *Enfoque*, 0(001), 31–42. <https://doi.org/10.26439/enfoque2015.n001.681>
- SEMARNAT. (2016). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016*. 228.
- SENER. (2015). Prospective of Electricity Sector 2015-2029. *Mexico Minister of Energy (SENER)*, 237. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf
- Serna, F., Barrera, L., & Montiel, H. (2011). Impacto Social y Económico en el Uso de Biocombustibles. *Journal of Technology Management & Innovation*, 6(1), 100–114. <https://doi.org/0718-2724>
- Serrano-Hernandez, A., Faulin, J., Pintor, J. M., & Belloso, J. (2017). Determining an Optimal Area to Locate a Biorefinery under Economic and Environmental Criteria. *Transportation Research Procedia*, 22, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.014>
- Sheinbaum-Pardo, C., Calderón-Irazoque, A., & Ramírez-Suárez, M. (2013). Potential of biodiesel from waste cooking oil in Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 56(55), 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.008>
- Sindhu, R., Gnansounou, E., Binod, P., & Pandey, A. (2016). Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products – An overview. *Renewable Energy*, 98, 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.057>
- Song, Y., Cho, E. J., Park, C. S., Oh, C. H., Park, B. J., & Bae, H. J. (2019). A strategy for sequential fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia stipitis* in bioethanol production from hardwoods. *Renewable Energy*, 139, 1281–1289. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.032>
- Swana, J., Yang, Y., Behnam, M., & Thompson, R. (2011). Bioresource Technology An analysis of net energy production and feedstock availability for biobutanol

- and bioethanol. *Bioresource Technology*, 102(2), 2112–2117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.051>
- Theyel, G. (2012). Production location and sustainability. *International Journal of Agile Systems and Management*, 5(3), 267–275. <https://doi.org/10.1504/IJASM.2012.047680>
- Thornley, P., Chong, K., & Bridgwater, T. (2014). European biorefineries: Implications for land, trade and employment. *Environmental Science and Policy*, 37, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.09.004>
- Torres, A., Castillo, V., Lugo, R., Lugo, H., Cervantez, J., & Aguilar, V. (2015). Poder calorífico inferior de biodiesel de distintas fuentes y su desempeño en el motor. *Memorias Del XXX Congreso Nacional de Termodinamica*, (March 2017).
- Trumbo, J. L., & Tonn, B. E. (2016). Biofuels: A sustainable choice for the United States' energy future? *Technological Forecasting and Social Change*, 104, 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.015>
- Wang, Y., Pengzhan Liu, S. O., & Zhang, Z. (2007). Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.04.016>
- Welfle, A. (2017). Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*, 105, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>
- Xu, C. (Charles), Liao, B., Pang, S., Nazari, L., Mahmood, N., Tushar, M. S. H. K., ... Ray, M. B. (2018). Biomass Energy. In *Comprehensive Energy Systems* (Vol. 1, pp. 770–794). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00121-8>
- Yan, J., & Yan, Y. (2017). Biodiesel Production and Technologies. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10110-1>

Capítulo IX. ANEXOS

9.1 Anexo I. Costo eléctrico por región.

La institución encargada de la generación y distribución de energía eléctrica en México establece diferentes regiones con su respectiva clasificación de horarios, estos se puede ver de la Tabla 30 a la Tabla 37. Además implanta tarifas según la región del país, en la Tabla 38 se puede apreciar los costos según por horario en el que se demanda energía en las principales ciudades de México.

Tabla 30. Región Baja California del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Intermedio	Semipunta	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 13:00 23:00 - 24:00	17:00 - 23:00	13:00 - 17:00
Sábado	0:00 - 24:00		
Domingo	0:00 - 24:00		

Tabla 31. Región Baja California del último domingo de octubre al 30 de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 17:00 22:00 - 24:00	17:00 - 22:00	
Sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
Domingo	0:00 - 24:00		

Tabla 32. Región Baja California sur del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes		0:00 - 12:30 22:30 - 24:00	12:30 - 22:30
Sábado		0:00 - 19:30 22:30 - 24:00	19:30 - 22:30
Domingo		0:00 - 24:00	

Tabla 33. Región Baja California sur del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00	
Sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
Domingo	0:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00	

Tabla 34. Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur del 1º de febrero al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:30 22:30 - 24:00	19:30 - 22:30
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Tabla 35. Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur del primer domingo de abril al 31 de julio

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	1:00 - 6:00	0:00 - 1:00 6:00 - 20:30 22:30 - 24:00	20:30 - 22:30
Sábado	1:00 - 7:00	0:00 - 1:00 7:00 - 24:00	
Domingo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Tabla 36. Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur del 1º de agosto al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:30 22:30 - 24:00	18:30 - 22:30
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Tabla 37. Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur del último domingo de octubre al 31 de enero

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:30 22:30 - 24:00	18:30 - 22:30
Sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:30 21:30 - 24:00	19:30 - 21:30
Domingo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Tabla 38. Costo de energía eléctrica por ciudad.

Estado	Ciudad	División	Cargo fijo (\$/mes)	Horario Base	Horario Intermedi a	Horario Punta	Capacida d
Aguascalientes	Aguascalientes	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Baja California	Ensenada	Baja California	2032.99	0.5493	0.9247	0	352.59
Baja California	Mexicali	Baja California	2032.99	0.5493	0.9247	0	352.59
Baja California Sur	La Paz	Baja California Sur	2032.99	2.2159	2.7722	0	291.7
Campeche	Campeche	Peninsular	1537.31	0.8884	1.5806	1.6959	336.63
Chiapas	Tapachula	Sureste	2245.15	0.7176	1.2982	1.436	305.65
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	Sureste	2245.15	0.7176	1.2982	1.436	305.65
Chihuahua	Chihuahua	Norte	2874.38	0.7719	1.2811	1.4706	352.59
Chihuahua	Ciudad Juárez	Norte	2874.38	0.7719	1.2811	1.4706	352.59
Chihuahua	Delicia	Norte	2874.38	0.7719	1.2811	1.4706	352.59
Coahuila de Zaragoza	Saltillo	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Coahuila de Zaragoza	Torreón	Norte	2874.38	0.7719	1.2811	1.4706	352.59
Coahuila de Zaragoza	Monclova	Golfo Norte Centro	1627.59	0.7181	1.2513	1.314	352.59
Colima	Colima	Occidente	1187.03	0.7988	1.4157	1.5879	352.59
Durango	Durango	Norte	2874.38	0.7719	1.2811	1.4706	352.59
Durango	Gómez Palacio	Norte	2874.38	0.7719	1.2811	1.4706	352.59
Estado de México	Toluca de Lerdo	Centro Sur Valle de	1471.89	0.8993	1.539	1.8045	352.59
Estado de México	Tultitlan	México Norte Valle de	1990.82	0.5853	1.064	1.1844	344.18
Estado de México	Ciudad de México	México Centro	1772.99	0.906	1.6245	1.8059	352.59

Estado de México	Cuautitlán Izcalli	Valle de México Norte	1990.82	0.5853	1.064	1.1844	344.18
Estado de México	Naucalpan de Juárez	Valle de México Norte	1990.82	0.5853	1.064	1.1844	344.18
Estado de México	Atizapán de Zaragoza	Valle de México Norte	1990.82	0.5853	1.064	1.1844	344.18
Estado de México	Tlalnepantla de Baz	Valle de México Norte	1990.82	0.5853	1.064	1.1844	344.18
Guanajuato	Pénjamo	Centro Occidente	1187.03	0.7988	1.4157	1.5879	352.59
Guanajuato	Dolores Hidalgo	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	San miguel de allende	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	San francisco del Rincón	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	Irapuato	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	Celaya	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	Salamanca	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	Silao	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	Guanajuato	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guanajuato	León de los Aldama	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Guerrero	Iguala de la independencia	Centro Sur	1471.89	0.8993	1.539	1.8045	352.59
Guerrero	Zihuatanejo	Centro Sur	1471.89	0.8993	1.539	1.8045	352.59
Guerrero	Chilpancingo de Bravo	Centro Sur	1471.89	0.8993	1.539	1.8045	352.59
Guerrero	Acapulco de Juárez	Centro Sur	1471.89	0.8993	1.539	1.8045	352.59
Hidalgo	Tula de Allende	Centro Oriente	1329.39	0.8423	1.436	1.6971	352.59
Hidalgo	Pachuca de soto	Centro Oriente	1329.39	0.8423	1.436	1.6971	352.59
Jalisco	Tlaquepaque	Jalisco	1510.07	0.7785	1.4191	1.6112	344.18
Jalisco	Puerto Vallarta	Jalisco	1510.07	0.7785	1.4191	1.6112	344.18

Jalisco	Guadalajara	Jalisco Centro	1510.07	0.7785	1.4191	1.6112	344.18
Michoacán	Lázaro Cárdenas	Occidente Centro	1187.03	0.7988	1.4157	1.5879	352.59
Michoacán	Zamora	Occidente Centro	1187.03	0.7988	1.4157	1.5879	352.59
Michoacán	Morelia	Occidente	1187.03	0.7988	1.4157	1.5879	352.59
Morelos	Cuernavaca	Centro Sur	1471.59	0.8993	1.539	1.8045	352.59
Nayarit	Tepic	Jalisco	1510.07	0.7785	1.4191	1.6112	344.18
Nuevo León	Monterrey	Golfo Norte	1627.59	0.7181	1.2513	1.314	352.59
Oaxaca	Oaxaca de Juárez	Sureste	2245.15	0.7176	1.2982	1.436	305.65
Puebla	Tehuacán	Centro Oriente	1329.39	0.8423	1.436	1.6971	352.59
Puebla	Puebla de Zaragoza	Centro Oriente	1329.39	0.8423	1.436	1.6971	352.59
Querétaro	San Juan del Río	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Querétaro	Santiago de Querétaro	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59
Quintana Roo	Cancún /Benito Chetumal/Othón p	Peninsular	1537.31	0.8884	1.5806	1.6959	336.63
Quintana Roo	blanco	Peninsular	1537.31	0.8884	1.5806	1.6959	336.63
San Luis Potosí	Ciudad Valles	Golfo Centro	1389.15	0.86	1.5218	1.6589	352.59
San Luis Potosí	San Luis Potosí	Golfo Centro	1389.15	0.86	1.5218	1.6589	352.59
Sinaloa	Guasave	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Sinaloa	Los Mochis /Ahome	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Sinaloa	Mazatlán	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Sinaloa	Culiacán Rosales	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Sonora	San Luis Río Colorado	Baja California	2032.99	0.5493	0.9247	0	352.59
Sonora	Ciudad Obregón /Cajeme	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Sonora	Nogales	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Sonora	Heroica Guaymas	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1

Sonora	Hermosillo	Noroeste	1835.54	0.6953	1.157	1.2768	344.1
Tabasco	Villahermosa /Centro	Sureste	2245.15	0.7176	1.2982	1.436	305.65
Tamaulipas	Nuevo Laredo	Golfo Norte	1627.59	0.7181	1.2513	1.314	352.59
Tamaulipas	Reynosa	Golfo Norte	1627.59	0.7181	1.2513	1.314	352.59
Tamaulipas	Ciudad Victoria	Golfo Centro	1389.15	0.86	1.5218	1.6589	352.59
Tamaulipas	Matamoros	Golfo Norte	1627.59	0.7181	1.2513	1.314	352.59
Tamaulipas	Tampico	Golfo Centro	1389.15	0.86	1.5218	1.6589	352.59
Tlaxcala	Tlaxcala	Centro Oriente	1329.39	0.8423	1.436	1.6971	352.59
Veracruz	Córdoba	Oriente	1452.19	0.8631	1.4506	1.706	352.59
Veracruz	Veracruz	Oriente	1452.19	0.8631	1.4506	1.706	352.59
Veracruz	Xalapa	Oriente	1452.19	0.8631	1.4506	1.706	352.59
Veracruz	Poza rica de Hidalgo	Oriente	1452.19	0.8631	1.4506	1.706	352.59
Veracruz	Minatitlán	Oriente	1452.19	0.8631	1.4506	1.706	352.59
Yucatán	Mérida	Peninsular	1537.31	0.8884	1.5806	1.6959	336.63
Zacatecas	Zacatecas	Bajío	1353.12	0.7655	1.414	1.563	352.59

9.2 Anexo II. Costo de agua potable

El costo del agua potable varía según el estado de la república en el que se encuentre y en el volumen consumido tal como se muestra en la Tabla 39, el costo mostrado es por un consumo de 35'000 litros al mes en clasificación industrial.

Tabla 39. Costo de agua potable en México.

Estado	Ciudad	Costo	Área
Aguascalientes	Aguascalientes	3053.39	Lerma Santiago Pacifico
Baja California	Ensenada	3732.5	Península de Baja Cali
Baja California	Mexicali	2168.52	Península de Baja Cali
Baja California	Tecate	2594.66	Península de Baja Cali
Baja California	Tijuana	3759.09	Península de Baja Cali
Baja California Sur	La paz	1100	Península de Baja Cali
Campeche	Campeche	590.74	Península de Yucatán
Chiapas	Tapachula	532.5	Frontera Sur
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	1283	Frontera Sur
Chihuahua	Chihuahua	953.55	Río bravo
Chihuahua	Ciudad Juárez	992.97	Río bravo
Chihuahua	Delicias	1019.14	Río bravo
Coahuila de Zaragoza	Monclova	2898.67	Río bravo
Coahuila de Zaragoza	Saltillo	1144.5	Río bravo
Coahuila de Zaragoza	Torreón	1326.5	Cuencas centrales del norte
colima	Colima	446.47	Lerma Santiago Pacifico
Durango	Durango	1402.5	Pacífico Norte
Durango	Gómez Palacio	2159.5	Cuencas centrales del norte
Estado de México	Toluca de Lerdo	1343.32	Lerma Santiago Pacifico
Estado de México	Atizapán de Zaragoza	2614.07	Aguas del Valle de México
Estado de México	Ciudad de México con subsidio	2055.14	Aguas del Valle de México
Estado de México	Ciudad de México sin subsidio	2379.82	Aguas del Valle de México
Estado de México	Cuautitlán Izcalli	2200.14	Aguas del Valle de México
Estado de México	Naucalpan de Juárez	2397.07	Aguas del Valle de México

Estado de México	Tlalnepantla de Baz	2809.82	Aguas del Valle de México
Estado de México	Tultitlan	1828.56	Aguas del Valle de México
Guanajuato	Celaya	1248.96	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	Dolores Hidalgo	795	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	Guanajuato	2294.27	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	Irapuato	1110	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	León de los Aldama	2638	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	Pénjamo	771.2	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	Salamanca	1749.36	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	San francisco del Rincón	1078.61	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	San miguel de allende	1025.64	Lerma Santiago Pacifico
Guanajuato	Silao	1843.87	Lerma Santiago Pacifico
Guerrero	Chilpancingo de Bravo	1116.5	Balsas
Guerrero	Iguala de la independencia	844	Balsas
Guerrero	Acapulco de Juárez	2033.54	Pacifico Sur
Guerrero	Zihuatanejo	855.5	Pacifico Sur
Hidalgo	Pachuca de soto	1886.5	Aguas del Valle de México
Hidalgo	Tula de Allende	1432.5	Aguas del Valle de México
Jalisco	Guadalajara	1246.06	Lerma Santiago Pacifico
Jalisco	Puerto Vallarta	980.5	Lerma Santiago Pacifico
Jalisco	Tlaquepaque	836.82	Lerma Santiago Pacifico
Michoacán	Lázaro Cárdenas	894	Balsas
Michoacán	Zamora	1486.88	Lerma Santiago Pacifico
Michoacán	Morelia	1824	Lerma Santiago Pacifico
Morelos	Cuernavaca	511.81	Balsas
Nayarit	Tepic	1750	Lerma Santiago Pacifico
Nuevo León	Monterrey	1079.17	Río bravo
Oaxaca	Oaxaca de Juárez	409.75	Pacifico Sur
Puebla	Puebla de Zaragoza	1345.5	Balsas
Puebla	Tehuacán	575	Golfo Centro
Querétaro	Santiago de Querétaro	3257.83	Lerma Santiago Pacifico
Querétaro	San juan del Río	1376.65	Golfo Norte
Quintana Roo	Cancún	599.18	Península de Yucatán
Quintana Roo	Chetumal	599.18	Península de Yucatán
San Luis Potosí	San Luis Potosí	1375	Cuencas centrales del norte
San Luis Potosí	Ciudad Valles	825.9	Golfo Norte
Sinaloa	Culiacán Rosales	791.66	Pacífico Norte
Sinaloa	Guasave	490.26	Pacífico Norte

Sinaloa	Los Mochis	620	Pacífico Norte
Sinaloa	Mazatlán	698.08	Pacífico Norte
Sonora	Ciudad Obregón	814.02	Noreste
Sonora	Hermosillo	1694.95	Noreste
Sonora	Heroica Guaymas	1491.25	Noreste
Sonora	Nogales	1088.4	Noreste
Sonora	San Luis Rio Colorado	483	Noreste
Tabasco	Villahermosa	184.84	Frontera Sur
Tamaulipas	Matamoros	950.5	Río bravo
Tamaulipas	Nuevo Laredo	562.5	Río bravo
Tamaulipas	Reynosa	655.48	Río bravo
Tamaulipas	Ciudad Victoria	873.18	Golfo Norte
Tamaulipas	Tampico	1472.5	Golfo Norte
Tlaxcala	Tlaxcala	1289.6	Balsas
Veracruz	Córdoba	483.31	Golfo Centro
Veracruz	Minatitlán	2290.08	Golfo Centro
Veracruz	Veracruz	579.83	Golfo Centro
Veracruz	Xalapa	979.37	Golfo Centro
Veracruz	Poza rica de Hidalgo	1215.4	Golfo Centro
Yucatán	Mérida	314	Península de Yucatán
			Cuencas centrales del
Zacatecas	Zacatecas	771.73	norte

9.3 Anexo III. Concentrado de valores

Los valores de las variables usadas en el modelo se pueden apreciar en la Tabla 40. En ella se encuentran los volúmenes disponibles de materia prima por estado, así como su factor de aprovechamiento y potencial energético según la tecnología asignada. De igual manera los costos por tonelada de materia prima, así como los costos asociados a la tecnología. De igual manera se aprecian los costos de agua y electricidad (fijo y variable) según el lugar asignado.

Tabla 40. Concentrado de valores

LUGARMP	TECNO	volIMP	volFacAprov	volPotEnerg	costMP	costMObra
CHPCA	Tecno1	722184	0.2000	21100	224	102.68
CHPCA	Tecno2	722184	0.1189	32000	224	102.68
CHPCA	Tecno3	722184	0.1400	30000	224	102.68
CHHRF	Tecno1	884457	0.1487	17000	523.69	102.68
CHHRF	Tecno2	884457	0.1688	21170	523.69	102.68
CHHRF	Tecno3	884457	0.4126	33320	523.69	102.68
DURRF	Tecno1	2356922	0.1487	17000	523.69	102.68
DURRF	Tecno2	2356922	0.1688	21170	523.69	102.68
DURRF	Tecno3	2356922	0.4126	33320	523.69	102.68
GRORF	Tecno1	191907	0.1487	17000	753.59	102.68
GRORF	Tecno2	191907	0.1688	21170	753.59	102.68
GRORF	Tecno3	191907	0.4126	33320	753.59	102.68
JALCA	Tecno1	1653278	0.2000	21100	760	102.68
JALCA	Tecno2	1653278	0.1189	32000	760	102.68
JALCA	Tecno3	1653278	0.1400	30000	760	102.68
JALRF	Tecno1	342254	0.1487	17000	753.59	102.68
JALRF	Tecno2	342254	0.1688	21170	753.59	102.68
JALRF	Tecno3	342254	0.4126	33320	753.59	102.68
MEXRF	Tecno1	296067	0.1487	17000	517.52	102.68
MEXRF	Tecno2	296067	0.1688	21170	517.52	102.68
MEXRF	Tecno3	296067	0.4126	33320	517.52	102.68
MICCA	Tecno1	294057	0.2000	21100	760	102.68
MICCA	Tecno2	294057	0.1189	32000	760	102.68
MICCA	Tecno3	294057	0.1400	30000	760	102.68
MICRF	Tecno1	447478	0.1487	17000	753.59	102.68
MICRF	Tecno2	447478	0.1688	21170	753.59	102.68
MICRF	Tecno3	447478	0.4126	33320	753.59	102.68
MORCA	Tecno1	484327	0.2000	21100	760	102.68
MORCA	Tecno2	484327	0.1189	32000	760	102.68
MORCA	Tecno3	484327	0.1400	30000	760	102.68

NAYCA	Tecno1	545976	0.2000	21100	760	102.68
NAYCA	Tecno2	545976	0.1189	32000	760	102.68
NAYCA	Tecno3	545976	0.1400	30000	760	102.68
OAXCA	Tecno1	894754	0.2000	21100	760	102.68
OAXCA	Tecno2	894754	0.1189	32000	760	102.68
OAXCA	Tecno3	894754	0.1400	30000	760	102.68
OAXRF	Tecno1	393685	0.1487	17000	224	102.68
OAXRF	Tecno2	393685	0.1688	21170	224	102.68
OAXRF	Tecno3	393685	0.4126	33320	224	102.68
PUECA	Tecno1	550457	0.2000	21100	760	102.68
PUECA	Tecno2	550457	0.1189	32000	760	102.68
PUECA	Tecno3	550457	0.1400	30000	760	102.68
PUERF	Tecno1	291738	0.1487	17000	753.59	102.68
PUERF	Tecno2	291738	0.1688	21170	753.59	102.68
PUERF	Tecno3	291738	0.4126	33320	753.59	102.68
ROOCA	Tecno1	481822	0.2000	21100	760	102.68
ROOCA	Tecno2	481822	0.1189	32000	760	102.68
ROOCA	Tecno3	481822	0.1400	30000	760	102.68
SLPCA	Tecno1	1487371	0.2000	21100	760	102.68
SLPCA	Tecno2	1487371	0.1189	32000	760	102.68
SLPCA	Tecno3	1487371	0.1400	30000	760	102.68
SONRF	Tecno1	200763	0.1487	17000	517.52	176.72
SONRF	Tecno2	200763	0.1688	21170	517.52	176.72
SONRF	Tecno3	200763	0.4126	33320	517.52	176.72
TABCA	Tecno1	763290	0.2000	21100	760	102.68
TABCA	Tecno2	763290	0.1189	32000	760	102.68
TABCA	Tecno3	763290	0.1400	30000	760	102.68
TAMCA	Tecno1	493983	0.2000	21100	760	176.72
TAMCA	Tecno2	493983	0.1189	32000	760	176.72
TAMCA	Tecno3	493983	0.1400	30000	760	176.72
VERCA	Tecno1	6251043	0.2000	21100	760	102.68
VERCA	Tecno2	6251043	0.1189	32000	760	102.68
VERCA	Tecno3	6251043	0.1400	30000	760	102.68
VERRF	Tecno1	522506	0.1487	17000	517.52	102.68
VERRF	Tecno2	522506	0.1688	21170	517.52	102.68
VERRF	Tecno3	522506	0.4126	33320	517.52	102.68
ZAGUACU	Tecno1	4043.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZAGUACU	Tecno2	4043.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZAGUACU	Tecno3	4043.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZCUEACU	Tecno1	4011.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZCUEACU	Tecno2	4011.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZCUEACU	Tecno3	4011.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZGUAACU	Tecno1	19233	0.9800	39157	8000	102.68
ZGUAACU	Tecno2	19233	0.7787	39157	8000	102.68
ZGUAACU	Tecno3	19233	0.9190	39157	8000	102.68

ZJUAACU	Tecno1	5777	0.9800	39157	8000	176.72
ZJUAACU	Tecno2	5777	0.7787	39157	8000	176.72
ZJUAACU	Tecno3	5777	0.9190	39157	8000	176.72
ZLAGACU	Tecno1	5272.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZLAGACU	Tecno2	5272.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZLAGACU	Tecno3	5272.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZLEOACU	Tecno1	6980	0.9800	39157	8000	102.68
ZLEOACU	Tecno2	6980	0.7787	39157	8000	102.68
ZLEOACU	Tecno3	6980	0.9190	39157	8000	102.68
ZMERACU	Tecno1	4219.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZMERACU	Tecno2	4219.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZMERACU	Tecno3	4219.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZMEXACU	Tecno1	4062.5	0.9800	39157	8000	176.72
ZMEXACU	Tecno2	4062.5	0.7787	39157	8000	176.72
ZMEXACU	Tecno3	4062.5	0.9190	39157	8000	176.72
ZMONACU	Tecno1	17806.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZMONACU	Tecno2	17806.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZMONACU	Tecno3	17806.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZPUEACU	Tecno1	11834	0.9800	39157	8000	102.68
ZPUEACU	Tecno2	11834	0.7787	39157	8000	102.68
ZPUEACU	Tecno3	11834	0.9190	39157	8000	102.68
ZQUEACU	Tecno1	4757.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZQUEACU	Tecno2	4757.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZQUEACU	Tecno3	4757.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZSLPACU	Tecno1	4512	0.9800	39157	8000	102.68
ZSLPACU	Tecno2	4512	0.7787	39157	8000	102.68
ZSLPACU	Tecno3	4512	0.9190	39157	8000	102.68
ZTIJACU	Tecno1	7595.5	0.9800	39157	8000	176.72
ZTIJACU	Tecno2	7595.5	0.7787	39157	8000	176.72
ZTIJACU	Tecno3	7595.5	0.9190	39157	8000	176.72
ZTOLACU	Tecno1	8396.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZTOLACU	Tecno2	8396.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZTOLACU	Tecno3	8396.5	0.9190	39157	8000	102.68
ZVMEACU	Tecno1	87240.5	0.9800	39157	8000	102.68
ZVMEACU	Tecno2	87240.5	0.7787	39157	8000	102.68
ZVMEACU	Tecno3	87240.5	0.9190	39157	8000	102.68

LUGARMP	TECNO	costFacTec	costElecFijo	costElecVar	costAgua
CHPCA	Tecno1	4157.81	26941.80	3231.583	532.50
CHPCA	Tecno2	4048.40	26941.80	3231.583	532.50
CHPCA	Tecno3	3799.20	26941.80	3231.583	532.50
CHHRF	Tecno1	5255.90	34492.56	3189.017	953.55
CHHRF	Tecno2	4157.81	34492.56	3189.017	953.55
CHHRF	Tecno3	4675.29	34492.56	3189.017	953.55
DURRF	Tecno1	5255.90	34492.56	3189.017	1402.50
DURRF	Tecno2	4157.81	34492.56	3189.017	1402.50
DURRF	Tecno3	4675.29	34492.56	3189.017	1402.50
GRORF	Tecno1	5255.90	17662.68	3831.002	844.00
GRORF	Tecno2	4157.81	17662.68	3831.002	844.00
GRORF	Tecno3	4675.29	17662.68	3831.002	844.00
JALCA	Tecno1	4157.81	18120.84	3532.537	836.82
JALCA	Tecno2	4048.40	18120.84	3532.537	836.82
JALCA	Tecno3	3799.20	18120.84	3532.537	836.82
JALRF	Tecno1	5255.90	18120.84	3532.537	836.82
JALRF	Tecno2	4157.81	18120.84	3532.537	836.82
JALRF	Tecno3	4675.29	18120.84	3532.537	836.82
MEXRF	Tecno1	5255.90	17662.68	3831.002	1343.32
MEXRF	Tecno2	4157.81	17662.68	3831.002	1343.32
MEXRF	Tecno3	4675.29	17662.68	3831.002	1343.32
MICCA	Tecno1	4157.81	14244.36	3524.074	894.00
MICCA	Tecno2	4048.40	14244.36	3524.074	894.00
MICCA	Tecno3	3799.20	14244.36	3524.074	894.00
MICRF	Tecno1	5255.90	14244.36	3524.074	894.00
MICRF	Tecno2	4157.81	14244.36	3524.074	894.00
MICRF	Tecno3	4675.29	14244.36	3524.074	894.00
MORCA	Tecno1	4157.81	17662.68	3831.002	511.81
MORCA	Tecno2	4048.40	17662.68	3831.002	511.81
MORCA	Tecno3	3799.20	17662.68	3831.002	511.81
NAYCA	Tecno1	4157.81	18120.84	3532.537	1750.00
NAYCA	Tecno2	4048.40	18120.84	3532.537	1750.00
NAYCA	Tecno3	3799.20	18120.84	3532.537	1750.00
OAXCA	Tecno1	4157.81	26941.80	3231.583	409.75
OAXCA	Tecno2	4048.40	26941.80	3231.583	409.75
OAXCA	Tecno3	3799.20	26941.80	3231.583	409.75
OAXRF	Tecno1	5255.90	26941.80	3231.583	409.75
OAXRF	Tecno2	4157.81	26941.80	3231.583	409.75
OAXRF	Tecno3	4675.29	26941.80	3231.583	409.75
PUECA	Tecno1	4157.81	15952.68	3574.606	575.00
PUECA	Tecno2	4048.40	15952.68	3574.606	575.00
PUECA	Tecno3	3799.20	15952.68	3574.606	575.00
PUERF	Tecno1	5255.90	15952.68	3574.606	575.00
PUERF	Tecno2	4157.81	15952.68	3574.606	575.00

PUERF	Tecno3	4675.29	15952.68	3574.606	575.00
ROOCA	Tecno1	4157.81	18447.72	3934.556	599.18
ROOCA	Tecno2	4048.40	18447.72	3934.556	599.18
ROOCA	Tecno3	3799.20	18447.72	3934.556	599.18
SLPCA	Tecno1	4157.81	16669.80	3788.186	825.90
SLPCA	Tecno2	4048.40	16669.80	3788.186	825.90
SLPCA	Tecno3	3799.20	16669.80	3788.186	825.90
SONRF	Tecno1	5255.90	24395.88	1475.850	483.00
SONRF	Tecno2	4157.81	24395.88	1475.850	483.00
SONRF	Tecno3	4675.29	24395.88	1475.850	483.00
TABCA	Tecno1	4157.81	26941.80	3231.583	184.84
TABCA	Tecno2	4048.40	26941.80	3231.583	184.84
TABCA	Tecno3	3799.20	26941.80	3231.583	184.84
TAMCA	Tecno1	4157.81	19531.08	3114.836	562.50
TAMCA	Tecno2	4048.40	19531.08	3114.836	562.50
TAMCA	Tecno3	3799.20	19531.08	3114.836	562.50
VERCA	Tecno1	4157.81	17426.28	3610.950	483.31
VERCA	Tecno2	4048.40	17426.28	3610.950	483.31
VERCA	Tecno3	3799.20	17426.28	3610.950	483.31
VERRF	Tecno1	5255.90	17426.28	3610.950	483.31
VERRF	Tecno2	4157.81	17426.28	3610.950	483.31
VERRF	Tecno3	4675.29	17426.28	3610.950	483.31
ZAGUACU	Tecno1	3002.55	16237.44	3519.842	3053.39
ZAGUACU	Tecno2	2555.69	16237.44	3519.842	3053.39
ZAGUACU	Tecno3	1828.10	16237.44	3519.842	3053.39
ZCUEACU	Tecno1	3002.55	17662.68	3831.002	511.81
ZCUEACU	Tecno2	2555.69	17662.68	3831.002	511.81
ZCUEACU	Tecno3	1828.10	17662.68	3831.002	511.81
ZGUAACU	Tecno1	3002.55	18120.84	3532.537	836.82
ZGUAACU	Tecno2	2555.69	18120.84	3532.537	836.82
ZGUAACU	Tecno3	1828.10	18120.84	3532.537	836.82
ZJUAACU	Tecno1	3002.55	34492.56	3189.017	992.97
ZJUAACU	Tecno2	2555.69	34492.56	3189.017	992.97
ZJUAACU	Tecno3	1828.10	34492.56	3189.017	992.97
ZLAGACU	Tecno1	3002.55	19531.08	3114.836	2898.67
ZLAGACU	Tecno2	2555.69	19531.08	3114.836	2898.67
ZLAGACU	Tecno3	1828.10	19531.08	3114.836	2898.67
ZLEOACU	Tecno1	3002.55	16237.44	3519.842	1078.61
ZLEOACU	Tecno2	2555.69	16237.44	3519.842	1078.61
ZLEOACU	Tecno3	1828.10	16237.44	3519.842	1078.61
ZMERACU	Tecno1	3002.55	18447.72	3934.556	314.00
ZMERACU	Tecno2	2555.69	18447.72	3934.556	314.00
ZMERACU	Tecno3	1828.10	18447.72	3934.556	314.00
ZMEXACU	Tecno1	3002.55	24395.88	1475.850	2168.52
ZMEXACU	Tecno2	2555.69	24395.88	1475.850	2168.52

ZMEXACU	Tecno3	1828.10	24395.88	1475.850	2168.52
ZMONACU	Tecno1	3002.55	19531.08	3114.836	1079.17
ZMONACU	Tecno2	2555.69	19531.08	3114.836	1079.17
ZMONACU	Tecno3	1828.10	19531.08	3114.836	1079.17
ZPUEACU	Tecno1	3002.55	15952.68	3574.606	575.00
ZPUEACU	Tecno2	2555.69	15952.68	3574.606	575.00
ZPUEACU	Tecno3	1828.10	15952.68	3574.606	575.00
ZQUEACU	Tecno1	3002.55	16237.44	3519.842	1376.65
ZQUEACU	Tecno2	2555.69	16237.44	3519.842	1376.65
ZQUEACU	Tecno3	1828.10	16237.44	3519.842	1376.65
ZSLPACU	Tecno1	3002.55	16669.80	3788.186	1375.00
ZSLPACU	Tecno2	2555.69	16669.80	3788.186	1375.00
ZSLPACU	Tecno3	1828.10	16669.80	3788.186	1375.00
ZTIJACU	Tecno1	3002.55	24395.88	1475.850	2594.66
ZTIJACU	Tecno2	2555.69	24395.88	1475.850	2594.66
ZTIJACU	Tecno3	1828.10	24395.88	1475.850	2594.66
ZTOLACU	Tecno1	3002.55	17662.68	3831.002	1343.32
ZTOLACU	Tecno2	2555.69	17662.68	3831.002	1343.32
ZTOLACU	Tecno3	1828.10	17662.68	3831.002	1343.32
ZVMEACU	Tecno1	3002.55	23889.84	2648.594	1828.56
ZVMEACU	Tecno2	2555.69	23889.84	2648.594	1828.56
ZVMEACU	Tecno3	1828.10	23889.84	2648.594	1828.56

UBICACIÓN DE INSTALACIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS

Por Didier Alejandro Poot Castillo

CANTIDAD DE PALABRAS 25530

HORA DE ENTREGA
NÚMERO DE
IDENTIFICACIÓN DEL
TRABAJO

30-JUN.-2020 05:53P. M.
60718963

UBICACIÓN DE INSTALACIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	aplicaciones.cfe.gob.mx Internet	407 palabras — 2%
2	www.ingquimica.uady.mx Internet	194 palabras — 1%
3	docplayer.es Internet	183 palabras — 1%
4	bdigital.unal.edu.co Internet	155 palabras — 1%
5	www.ampl.com Internet	153 palabras — 1%
6	Chhaya Rekhate, Abhinesh Kumar Prajapati. "Production, engine performance, combustion, emission characteristics and economic feasibility of biodiesel from waste cooking oil: A review", Environmental Quality Management, 2019 Crossref	121 palabras — < 1%
7	docslide.net Internet	105 palabras — < 1%
8	www.cfe.mx Internet	95 palabras — < 1%
9	www.infocana.gob.mx Internet	93 palabras — < 1%

10	link.springer.com Internet	80 palabras — < 1%
11	spotidoc.com Internet	62 palabras — < 1%
12	onlinelibrary.wiley.com Internet	60 palabras — < 1%
13	documents.mx Internet	58 palabras — < 1%
14	www.itc.mx Internet	54 palabras — < 1%
15	jukuri.luke.fi Internet	54 palabras — < 1%
16	aei.pitt.edu Internet	53 palabras — < 1%
17	www.econjournals.com Internet	52 palabras — < 1%
18	archivos.guaymas.gob.mx Internet	47 palabras — < 1%
19	Bamidele Victor Ayodele, May Ali Alsaffar, Siti Indati Mustapa. "An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks", Journal of Cleaner Production, 2020 Crossref	45 palabras — < 1%
20	es.unionpedia.org Internet	45 palabras — < 1%
21	dspace.esPOCH.edu.ec Internet	45 palabras — < 1%
22	cmos.mirc.gatech.edu	

	Internet	43 palabras — < 1%
23	www.growingscience.com Internet	41 palabras — < 1%
24	discovery.ucl.ac.uk Internet	41 palabras — < 1%
25	academica-e.unavarra.es Internet	40 palabras — < 1%
26	repository.tudelft.nl Internet	40 palabras — < 1%
27	Thomas Lichtmannegger, Carolina Kinzel, Wolfgang Müller, Anke Bockreis. "Energy recovery from grease traps wastes – potential for production of biodiesel and biogas", Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 2018 Crossref	38 palabras — < 1%
28	library.itc.utwente.nl Internet	38 palabras — < 1%
29	www.scielo.cl Internet	37 palabras — < 1%
30	nova_scientia.delasalle.edu.mx Internet	36 palabras — < 1%
31	research.birmingham.ac.uk Internet	35 palabras — < 1%
32	tyndall.ac.uk Internet	34 palabras — < 1%
33	repositorio.ulima.edu.pe Internet	34 palabras — < 1%

34	dof.gob.mx Internet	33 palabras — < 1%
35	Benjamin Claessens, Melissa De Staercke, Evelyn Verstraete, Gino Baron, Julien Cousin-Saint-Remi, Joeri F.M. Denayer. "Identifying selective adsorbents for the recovery of renewable isobutanol", ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020 Crossref	32 palabras — < 1%
36	eprints.qut.edu.au Internet	31 palabras — < 1%
37	dspace.lboro.ac.uk Internet	31 palabras — < 1%
38	m.scirp.org Internet	30 palabras — < 1%
39	Enno Bahrs, Elisabeth Angenendt. "Status quo and perspectives of biogas production for energy and material utilization", GCB Bioenergy, 2018 Crossref	30 palabras — < 1%
40	www.scirp.org Internet	29 palabras — < 1%
41	ascelibrary.org Internet	29 palabras — < 1%
42	alianzaelectricacom Internet	28 palabras — < 1%
43	landcover.usgs.gov Internet	28 palabras — < 1%
44	www.springerprofessional.de Internet	28 palabras — < 1%
45	repositorio.uns.edu.pe Internet	28 palabras — < 1%

46	worldwidescience.org Internet	28 palabras — < 1%
47	documentop.com Internet	28 palabras — < 1%
48	www.autoluca.com Internet	27 palabras — < 1%
49	www.scielo.br Internet	26 palabras — < 1%
50	www.xoch.info Internet	26 palabras — < 1%
51	eprints.lancs.ac.uk Internet	25 palabras — < 1%
52	Riska Ayu Purnamasari, Ryozo Noguchi, Tofael Ahamed. "Land suitability assessments for yield prediction of cassava using geospatial fuzzy expert systems and remote sensing", <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 2019 Crossref	25 palabras — < 1%
53	eprints.uanl.mx Internet	25 palabras — < 1%
54	dspace.ucuenca.edu.ec Internet	25 palabras — < 1%
55	tplegal.net Internet	24 palabras — < 1%
56	uvadoc.uva.es Internet	24 palabras — < 1%
57	hotels.com.mx Internet	23 palabras — < 1%
58	203.158.6.22:8080 Internet	23 palabras — < 1%

59	ideas.repec.org Internet	23 palabras — < 1%
60	intellectum.unisabana.edu.co:8080 Internet	23 palabras — < 1%
61	www.gob.mx Internet	22 palabras — < 1%
62	www.coursehero.com Internet	22 palabras — < 1%
63	journals.vgtu.lt Internet	21 palabras — < 1%
64	www.infonavit.com.mx Internet	20 palabras — < 1%
65	Ali Nawaz, Hamid Mukhtar, Ikram ul Haq, Zainab Mazhar, Muhammad Waseem Mumtaz. "Laccase: An Environmental Benign Pretreatment Agent for Efficient Bioconversion of Lignocellulosic Residues to Bioethanol", Current Organic Chemistry, 2019 Crossref	20 palabras — < 1%
66	www.bdigital.unal.edu.co Internet	20 palabras — < 1%
67	"Green Fuels Technology", Springer Science and Business Media LLC, 2016 Crossref	19 palabras — < 1%
68	www.dspace.uce.edu.ec Internet	19 palabras — < 1%
69	es.scribd.com Internet	19 palabras — < 1%
70	eprints.ucm.es Internet	19 palabras — < 1%

71	VICTORIA LERMA ARCE. "Planificación, logística y valorización de biomasa forestal residual en la provincia de Valencia.", Universitat Politecnica de Valencia, 2015 Crossref Posted Content	19 palabras — < 1%
72	www.diva-portal.org Internet	18 palabras — < 1%
73	hal.univ-lorraine.fr Internet	18 palabras — < 1%
74	Cataldo De Blasio. "Fundamentals of Biofuels Engineering and Technology", Springer Science and Business Media LLC, 2019 Crossref	18 palabras — < 1%
75	aip.scitation.org Internet	18 palabras — < 1%
76	ia601205.us.archive.org Internet	18 palabras — < 1%
77	Carmen Mireya Lapo Pauta. "DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN PARA SU EXPLOTACIÓN A TURNOS", Universitat Politecnica de Valencia, 2019 Crossref Posted Content	16 palabras — < 1%
78	Wei Wu, Jo-Shu Chang. "Integrated algal biorefineries from process systems engineering aspects: A review", Bioresource Technology, 2019 Crossref	16 palabras — < 1%
79	repositorio.espe.edu.ec Internet	16 palabras — < 1%
80	"Biotechnology for Biofuels: A Sustainable Green Energy Solution", Springer Science and Business Media LLC, 2020 Crossref	16 palabras — < 1%

81	Erdiwansyah, R. Mamat, M.S.M. Sani, K. Sudhakar, Asep Kadarohman, R.E Sardjono. "An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines", Energy Reports, 2019 Crossref	16 palabras — < 1%
82	hostinguate.com Internet	15 palabras — < 1%
83	www.mincyt.gob.ar Internet	15 palabras — < 1%
84	A. Macías-Almazán, J.A. Lois-Correa, M.A. Domínguez-Crespo, A.B. López-Oyama et al. "Influence of operating conditions on proton conductivity of nanocellulose films using two agroindustrial wastes: Sugarcane bagasse and pinewood sawdust", Carbohydrate Polymers, 2020 Crossref	15 palabras — < 1%
85	Leticia Casas-Godoy, Iliana Barrera-Martínez, Neydeli Ayala-Mendivil, Oscar Aguilar-Juárez et al. "Biofuels", Elsevier BV, 2020 Crossref	15 palabras — < 1%
86	www.iniciativasustentable.com.mx Internet	15 palabras — < 1%
87	prezi.com Internet	15 palabras — < 1%
88	a-mlm.com Internet	14 palabras — < 1%
89	ri.uaemex.mx Internet	14 palabras — < 1%
90	icasa.ws Internet	13 palabras — < 1%
91	www.climate-transparency.org Internet	13 palabras — < 1%

92	pdfs.semanticscholar.org Internet	13 palabras — < 1%
93	Nurul Syahirah Mat Aron, Kuan Shiong Khoo, Kit Wayne Chew, Pau Loke Show, Wei-Hsin Chen, The Hong Phong Nguyen. "Sustainability of the four generations of biofuels – A review", International Journal of Energy Research, 2020 Crossref	13 palabras — < 1%
94	"Water Resources of Mexico", Springer Science and Business Media LLC, 2020 Crossref	13 palabras — < 1%
95	ruidera.uclm.es Internet	13 palabras — < 1%
96	redisa.unican.es Internet	13 palabras — < 1%
97	HARALD WILSON FERNÁNDEZ PURATICH. "VALORIZACIÓN INTEGRAL DE LA BIOMASA LEÑOSA AGROFORESTAL A LO LARGO DEL GRADIENTE ALTITUDINAL EN CONDICIONES MEDITERRÁNEAS", Universitat Politècnica de Valencia, 2013 Crossref Posted Content	13 palabras — < 1%
98	Myriam A. Amezcua-Allieri, Elías Martínez-Hernández, Omar Anaya-Reza, Moisés Magdaleno-Molina et al. "Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico", Food and Bioproducts Processing, 2019 Crossref	13 palabras — < 1%
99	www.sedesol.gob.mx Internet	12 palabras — < 1%
100	psasir.upm.edu.my Internet	12 palabras — < 1%
101	www.mdpi.com	

Internet

12 palabras — < 1 %

102 www.rightsandresources.org
Internet

12 palabras — < 1 %

103 www.bib.fcien.edu.uy
Internet

12 palabras — < 1 %

104 twenergy.com
Internet

12 palabras — < 1 %

105 www.especieenpeligro.org
Internet

12 palabras — < 1 %

106 cienciayenergia.com
Internet

12 palabras — < 1 %

107 infovidrio.webcindario.com
Internet

12 palabras — < 1 %

108 repositorio.upao.edu.pe
Internet

12 palabras — < 1 %

109 www.uanl.mx
Internet

12 palabras — < 1 %

110 www.exchangezones.com
Internet

11 palabras — < 1 %

111 www.sma.df.gob.mx
Internet

11 palabras — < 1 %

112 curve.coventry.ac.uk
Internet

11 palabras — < 1 %

113 creativecommons.org
Internet

11 palabras — < 1 %

114	Dulce Rocío Mota-López, Cuauhtémoc Sánchez-Ramírez, Giner Alor-Hernández, Jorge Luis García-Alcaraz et al. "Evaluation of the impact of water supply disruptions in bioethanol production", Computers & Industrial Engineering, 2018 Crossref	11 palabras — < 1%
115	www.actauniversitaria.ugto.mx Internet	11 palabras — < 1%
116	www.unesco.org.uy Internet	11 palabras — < 1%
117	repository.javeriana.edu.co Internet	11 palabras — < 1%
118	www.slideshare.net Internet	11 palabras — < 1%
119	www.ruizhealytimes.com Internet	11 palabras — < 1%
120	diariodigital.ujaen.es Internet	11 palabras — < 1%
121	Jerome A. Ramirez, Thomas J. Rainey. "Comparative techno-economic analysis of biofuel production through gasification, thermal liquefaction and pyrolysis of sugarcane bagasse", Journal of Cleaner Production, 2019 Crossref	10 palabras — < 1%
122	biodieseleducation.org Internet	10 palabras — < 1%
123	www.infoteca.cnptia.embrapa.br Internet	10 palabras — < 1%
124	www.onepetro.org Internet	10 palabras — < 1%

125	David E. Flores-Jiménez, Noel Carbajal, Marcos Algara-Siller, Noé Aguilar-Rivera et al. "Atmospheric dispersion of methane emissions from sugarcane burning in Mexico", Environmental Pollution, 2019 Crossref	10 palabras — < 1%
126	trid.trb.org Internet	10 palabras — < 1%
127	www.linguee.es Internet	10 palabras — < 1%
128	ve.sun.com Internet	10 palabras — < 1%
129	www.journaluidegye.com Internet	10 palabras — < 1%
130	www.agronegocios.gob.sv Internet	10 palabras — < 1%
131	iqcelaya.itc.mx Internet	10 palabras — < 1%
132	www.cedeti.org Internet	10 palabras — < 1%
133	mafiadoc.com Internet	10 palabras — < 1%
134	www.medicina.unal.edu.co Internet	9 palabras — < 1%
135	estoesnada.blogcindario.com Internet	9 palabras — < 1%
136	www.scielo.org.mx Internet	9 palabras — < 1%
137	Matthew R. Moore, Ronald D. Cave, Marc A. Branham. "Annotated catalog and bibliography of	9 palabras — < 1%

the cyclocephaline scarab beetles (Coleoptera, Scarabaeidae, Dynastinae, Cyclocephalini)", ZooKeys, 2018

Crossref

138	ca.wikipedia.org Internet	9 palabras — < 1%
139	www.idlo.int Internet	9 palabras — < 1%
140	researchonline.ljmu.ac.uk Internet	9 palabras — < 1%
141	eprints.nottingham.ac.uk Internet	9 palabras — < 1%
142	export.arxiv.org Internet	9 palabras — < 1%
143	www.redalyc.org Internet	9 palabras — < 1%
144	metodosestadisticos.unizar.es Internet	9 palabras — < 1%
145	www.scribd.com Internet	9 palabras — < 1%
146	franquicialo.com Internet	9 palabras — < 1%
147	www.portalagrario.gob.pe Internet	9 palabras — < 1%
148	www.soloenergia.com.ar Internet	9 palabras — < 1%
149	lex.uh.cu Internet	9 palabras — < 1%
150	gestiopolis.com Internet	9 palabras — < 1%

151	hdl.handle.net Internet	9 palabras — < 1%
152	repositorio.utc.edu.ec Internet	9 palabras — < 1%
153	www.porcelanosa.com Internet	9 palabras — < 1%
154	fairtrade.socioeco.org Internet	9 palabras — < 1%
155	Rosa Isela Castillo Zamudio. "Inactivación microbiana en matrices cárnicas mediante fluidos supercríticos asistidos por ultrasonidos de potencia", Universitat Politecnica de Valencia, 2015 Crossref Posted Content	9 palabras — < 1%
156	Jonathan Moncada, Luis G. Matallana, Carlos A. Cardona. "Selection of Process Pathways for Biorefinery Design Using Optimization Tools: A Colombian Case for Conversion of Sugarcane Bagasse to Ethanol, Poly-3-hydroxybutyrate (PHB), and Energy", Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013 Crossref	9 palabras — < 1%
157	pt.scribd.com Internet	9 palabras — < 1%
158	bdigital.uncu.edu.ar Internet	9 palabras — < 1%
159	consumidoresint.cl Internet	9 palabras — < 1%
160	recursosbiblioteca.utp.edu.co Internet	9 palabras — < 1%
161	www.metrobilbao.net	