



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

“Aprovechamiento de biomasa leñosa de medio rural del estado de Yucatán mediante un proceso de gasificación para producción de energía eléctrica”

Tesis que presenta

MIA Sergio René Rodríguez Jiménez

En opción al título de

DOCTOR EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida Yucatán, agosto de 2019

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada Número 002973 para completar mis estudios de doctorado.

Al Fondo Sectorial Conacyt-Sener sustentabilidad por su apoyo al proyecto “Uso de biomasa leñosa como biocombustible sólido para la generación de energía eléctrica en zonas rurales” con clave 249581.

A mi comité de Tesis: Dr Gonzalo Canché Escamilla, Dr. Luis Felipe Barahona Pérez, Dr. Donny Ponce Marbán y Dra María Puig Arnavat, especialmente a los doctores Canché y Barahona por su infinita paciencia.

Al personal de laboratorios del CICY, en especial a Santiago Duarte Aranda por su enorme apoyo en la realización análisis termogravimétrico y pruebas de laboratorio.

Al Dr. Adrián Ghilardi y la beca de movilidad del CICY que me permitió visitarlo para el análisis MOFUSS en el LANASE (Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica) de la UNAM, unidad Morelia.

A mi familia por su apoyo, especialmente a Jorge Carlos y Totoro.

A mis amigos y compañeros en los cursos y proyectos de los estudios del doctorado.

INDICE

RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	4
ANTECEDENTES	4
1.1 Situación energética en México.....	4
1.1.1. Energy stacking (Traslape de fuentes de energía)	6
1.1.2 Tendencias en el consumo de energía residencial en México.....	7
1.2 Evaluación de recursos de biomasa	9
1.2.1 Vegetación de la Península de Yucatán.....	9
1.2.2 Vegetación en el Estado de Yucatán	11
1.2.3 Disponibilidad de material leñoso	18
1.2.4 Uso de leña en el Estado de Yucatán.....	22
1.2.5 Modelación con Sistemas de Información Geográfica	23
1.2.6 Calidad de combustible y composición de la biomasa leñosa	28
1.3 Conversión energética de la biomasa	29
1.4 Gasificación de biomasa.....	32
1.4.1 Tipos de gasificadores	33
1.4.2 Etapas y reacciones de la gasificación	35
1.4.3 Calidad del gas producido.....	36
1.4.4 Gasificadores para producción de energía eléctrica a pequeña escala	38
HIPÓTESIS	40
OBJETIVOS (GENERAL Y ESPECÍFICOS).....	40
CAPÍTULO 2	41
MATERIALES Y MÉTODOS	41
2.1 Cantidad de biomasa leñosa disponible	41

2.2 Determinación de la composición química y caracterización física de la biomasa leñosa	41
2.3 Determinación de las variables cinéticas de reacción en atmósfera inerte por medio de análisis termogravimétrico	46
2.4 Pirolisis y gasificación en horno horizontal	50
2.5 Viabilidad económica de sistema de gasificación de biomasa en sistema aislado para generación de electricidad	51
CAPÍTULO 3	54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
3.1 Potencial y Disponibilidad de material leñoso en el Estado de Yucatán	54
3.1.1 Inventarios y ecuaciones alométricas	54
3.1.2 Resultados de MOFUSS	55
3.3 Análisis elemental de leña, determinación de poder calorífico y FVI	67
3.4 Análisis termogravimétrico de leña	71
3.5 Determinación de las variables cinéticas de reacción por medio de análisis termogravimétrico	73
3.6 Pirolización y gasificación en horno horizontal	81
3.6.1 Efecto de la temperatura sobre la pirólisis de <i>Senegalia gaumeri</i>	83
3.7 Curvas de secado de leña para las especies analizadas	85
3.8 Viabilidad económica de sistema de gasificación de biomasa, sistema aislado	87
3.8.1 Operación a diez horas.....	87
3.8.2 Operación a 24 horas	93
3.8.3 Análisis de sensibilidad.....	95
3.8.4 Otras consideraciones de viabilidad económica	96
3.9 Viabilidad en el medio rural del Estado de Yucatán de unidad de gasificación para producción de electricidad	96
3.9.1 Necesidad de electrificación en el medio rural.	96

3.9.2 Modelación de casas tipo para sistema aislado en el medio rural del estado de Yucatán	97
CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXO – CÁLCULOS ECONÓMICOS	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo Final de Energía en México por Sectores, 1985-2017, (excluyendo el consumo del sector energético). Construida con datos del Sistema Nacional de Energía, (SIE) []	4
Figura 1.2 Fuentes de generación de energía eléctrica México, 2017 []	5
Figura 1.3 Evolución de la energía obtenida por leña y electricidad en los hogares de México, 1998-2017. Construida con datos del Sistema Nacional de Energía, (SIE) []	8
Figura 1.4 Consumo de energía residencial por fuente en México. Construida con datos del Sistema Nacional de Energía, (SIE) [26].....	8
Figura 1.5 Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por tipo de combustible principal para cocinar según regiones climáticas. Fuente: INEGI 2018 [27]....	9
Figura 1.6 Tipos de Vegetación Potencial en la Península de Yucatán. Elaboración propia, basado en [30].	10
Figura 1.7 Distribución de formaciones forestales del Estado de Yucatán [33]	12
Figura 1.8 Áreas de las formaciones forestales del Estado de Yucatán [33].	13
Figura 1.9 Mapa de Zonificación Forestal del Estado de Yucatán [33]	18
Figura 1.10 Áreas de alta prioridad, incluido municipios del norte y centro de Yucatán, [49]	25
Figura 1.11 Diagrama simplificado de flujo de MOFUSS, [50]	27
Figura 1.12 Rutas de Conversión de Biomasa a Energía, []	30
Figura 1.13 Sistema de gasificación de biomasa leñosa para la obtención de electricidad, basado en S. Schuck [57]	33
Figura 1.14 Tipos de Gasificadores, [53]	34
Figura 1.15 Cambios químicos durante la conversión de biomasa, [68]	37
Figura 1.16 Gasificador Downdraft Imbert, [69]	38
Figura 2.1. Astillas y fibras molidas de <i>Senegalia gaumeri</i>	43
Figura 2.2 Diagrama de sistema para la pirolización y gasificación en horno horizontal, elaboración propia	51
Figura 3.1 Polígono de delimitación del área del estado de Yucatán usado para el análisis de MOFUSS. Gráfica generada por MOFUSS.	56
Figura 3.2 Graficas de Above ground biomass (agb), non-renewable biomass (nrb), fraction of non-renewable biomass (fnrb) de uso de leña, generados por el análisis de MOFUSS del Estado de Yucatán.	57
Figura 3.3 Mapas de Biomasa de vegetación, su extracción no renovable (NRB), así como leña producto de la deforestación y el aprovechamiento forestal para el estado de Yucatán, generados mediante el análisis de MOFUSS	59
Figura 3.4 Regiones del estado de Yucatán para el análisis de MOFUSS. Elaboración propia de polígonos en Google Earth.....	60
Figura 3.5 Resultados de análisis MOFUSS para la región de Mérida. Gráficos de BaU (izquierda) e ICS (derecha). Dónde agb: above ground biomass, nrb: non-renewable biomass, fnrb: fraction of non-renewable biomass, tDM:tons dry matter.	63

Figura 3.6 Resultados de análisis MOFUSS para la región de Ticul. Donde agb: above ground biomass, nrb: non-renewable biomass, fnrb: fraction of non-renewable biomass, tDM:tons dry matter.....	64
Figura 3.7 Curvas de TGA y DTGA de las especies, obtenidas usando una rampa de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno.	72
Figura 3.8 Efecto de la rampa de calentamientos sobre las curvas de TGA y DTGA de <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	75
Figura 3.9 Gráfico para el método Kissinger, para la especie <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	76
Figura 3.10 Conversión para las cuatro rampas de calentamiento, <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	77
Figura 3.11 Gráfico para el método Flynn-Wall-Ozawa (FWO), <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	77
Figura 3.12 Gráfica para el método Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	78
Figura 3.13. Monitoreo <i>in situ</i> de la composición de los gases de la pirolisis de <i>Senegalia gaumeri</i>	85
Figura 3.14 Curvas de secado para piezas de leña de las especies estudiadas.....	86
Figura 3.15 Viabilidad económica de sistema de gasificación para producción de energía eléctrica, Gráfica de Factor de Utilización contra precio de electricidad	91
Figura 3.16 Flujos de efectivo, Sistema de gasificador operando 10 horas, Factor de Utilización al 100%	92
Figura 3.17 Flujos de efectivo, Sistema diésel operando 10 horas, Factor de Utilización al 100%.....	92
Figura 3.18 Viabilidad económica de sistema de gasificación para producción de energía eléctrica, Gráfica de Factor de Utilización contra precio de electricidad	93
Figura 3.19 Flujos de efectivo, Sistema de gasificador operando 24 horas, Factor de Utilización al 100%	94
Figura 3.20 Flujos de efectivo, Sistema diésel operando 24 horas, Factor de Utilización al 100%.....	94
Figura 3.21 Análisis de sensibilidad, Sistema de gasificación y diésel operando 10 horas,	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Superficie forestal del Estado de Yucatán en Hectáreas [33].....	13
Tabla 1.2 Frecuencia de las especies en las formaciones de Selva Mediana y Baja en el Estado de Yucatán, [33]	14
Tabla 1.3 ZONIFICACIÓN FORESTAL DEL ESTADO DE YUCATÁN [33]	18
Tabla 1.4 Estimación del Incremento Medio Anual, de la UMAFOR 3102, [42]	21
Tabla 1.5 Producción estimada en caso de estar bajo manejo forestal sustentable, de la UMAFOR 3102, [42].....	21
Tabla 1.6 Composición química, base seca, de especies reportadas en la literatura [51] 28	
Tabla 2.1 Especies con mayor frecuencia relativa de uso de acuerdo con el trabajo de Quiroz-Carranza y Orellana (2010), [45]	42
Tabla 2.2 Especies con mayor frecuencia en el PCTY de uso de acuerdo con el trabajo, S. Escalante Rebolledo, (2015, sin publicar).	42
Tabla 3.1 Características de las regiones en las que se dividió el Estado, datos de población compilados del INEGI, [82]	61
Tabla 3.2 Uso de leña obtenida del modelado por MOFUSS para diferentes regiones del Estado de Yucatán.	65
Tabla 3.3 Composición química de las especies estudiadas.	67
Tabla 3.4 Análisis elemental de muestras de madera, capacidad calorífica y FVI.	69
Tabla 3.5 Análisis elemental, mediante EDX, de cenizas obtenidas de la calcinación de las especies estudiadas.	70
Tabla 3.6 Parámetros del Análisis Termogravimétrico de las especies de leña.	73
Tabla 3.7 Valores obtenidos de parámetros cinéticos, método FWO, para <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	79
Tabla 3.8 Valores obtenidos de parámetros cinéticos, método KAS, para <i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	79
Tabla 3.9 Valores obtenidos de parámetros cinéticos, todos los métodos, para todas las especies muestreadas.....	80
Tabla 3.10 Rendimientos de las fracciones carbonosas, líquidas y gaseosas del proceso de pirólisis de las especies estudiadas. T final = 500 °C, rampa de calentamiento de 20 °C/min.....	82
Tabla 3.11 Rendimientos de las fracciones carbonosas, líquidas y gaseosas del proceso de pirólisis y gasificación de la biomasa leñosa. T de inicio de adición de aire = 700 °C; T final = 900 °C.....	83
Tabla 3.12. Efecto de la temperatura sobre la pirólisis de <i>Senegalia gaumeri</i> . Rampa de calentamiento de 30°C/min. Tiempo de residencia a la temperatura final: 30 min.....	84
Tabla 3.13 Análisis elemental de la fracción carbonosa obtenida de la pirólisis de <i>Senegalia gaumeri</i> a diferentes temperaturas	84
Tabla 3.14 Supuestos iniciales de viabilidad económica para sistema aislado.....	87
Tabla 3.15 Parámetros del gasificador para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado	88

Tabla 3.16 Costos para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado.....	89
Tabla 3.17 Valor presente de leña a utilizar en el proyecto y precios de equilibrio por kWh para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado.....	90
Tabla 3.18 Parámetros del generador diésel para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado.	90
Tabla 3.19 Dispositivos y electrodomésticos y sus requerimientos para sistema aislado.	97

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AGB: Above Ground Biomass

CONAFOR: Consejo Nacional Forestal

IMA: Incremento Medio Anual

INFyS: inventario Nacional Forestal y de Suelos

LGDFS: Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

MOFUSS: Modelling Fuelwood Savings Scenario

RTA: Rollo Tronco Árbol, volumen de madera del fuste y corteza, sin incluir ramas

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

UMAFOR: Unidad de Manejo Forestal

WISDOM: Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping

RESUMEN

La investigación descrita en esta tesis se basa en la hipótesis de la existencia de material leñoso, que puede ser recolectada de manera ambientalmente sustentable en comunidades rurales en el estado de Yucatán, en cantidades suficientes para la operación de sistemas de gasificación y producción de energía eléctrica, con viabilidad técnica y económica a largo plazo.

Se determinó, a través de inventarios forestales y muestreos realizados, que la biomasa disponible en el estado para fines productivos es de 20.29 millones de m³ de madera. Mediante simulación por computadora del consumo de leña usando MOFUSS (*Modelling Fuelwood Savings Scenario*), se obtuvo que en todas las regiones un aumento en biomasa en el período modelado y que, a través de la introducción de estufas mejoradas de leña, se tiene un ahorro en el consumo de leña en el 2020 de 109,000 ton de leña, que puede ser utilizado para generar electricidad mediante gasificación y satisfacer las necesidades de electricidad del 23% de la población rural del Estado.

Se caracterizaron seis especies (*Neomillspaughia emarginata*, *Havardia albicans*, *Croton glabellus*, *Lysiloma latisiliquum*, *Lonchocarpus yucatanensis* y *Senagalia gaumeri*) representativas de la vegetación de la selva caducifolia del estado de Yucatán mediante la determinación de su composición química y sus propiedades térmicas. Se obtuvo un alto contenido de extraíbles (16-27%), un contenido de lignina de (17-24%) y de holocelulosa (54-63%) de las especies estudiadas, así como un poder calorífico entre 16.2-18.5 MJ/kg, que los hace adecuadas para su aplicación en procesos termoquímicos para la generación de energía. Las especies analizadas muestran relativamente altos contenidos de ceniza, del alrededor del 5%, reportados normales para especies tropicales en la literatura consultada. El valor del FVI (Fuel Value Index), indicativo del valor del material como combustible, resultó entre 2,079 y 3,914, con los valores más altos para las especies *S. gaumeri* y *L. yucatanensis*, debido principalmente a sus más altas densidades. Adicionalmente, el análisis cinético de la pirólisis mostró que las especies *L. yucatanensis* y *H. albicans* presentan los valores más bajos de energía de activación, por lo que requieren menor energía para iniciar su descomposición térmica y pueden ser más adecuadas en el proceso de gasificación. En la pirólisis de las muestras, a 500 °C, se obtuvo una fracción carbonosa (25-30%), una fracción volátil condensable o bioaceite (36-49%) y de gases no condensables (27-34%), cuyo rendimiento están relacionadas a su composición química.

Los extraíbles están relacionados a la producción de bioaceite mientras que la lignina está relacionada a la producción de la fracción carbonosa. Con base a la composición y las propiedades térmicas así como el rendimiento de los productos de la pirólisis, la preferencia para uso de las especies en el proceso de gasificación sería el siguiente: *N. emarginata* > *H. albicans* > *C. glabellus* > *L. latisiliquum* > *L. yucatanensis* > *S. gaumeri*.

Tomando como base un sistema de producción de electricidad por medio de gasificación (Power Pallet de APL) con potencia nominal de 20KW, se realizó una modelación económica preliminar de una red eléctrica aislada alimentada con este sistema, con resultados positivos. La modelación arroja costos de electricidad favorables en red aislada, en comparación con un sistema equivalente de combustión diésel, en dos modalidades: con operación diaria a 10 horas y con operación a 24 hrs. La desventaja de la red con gasificador es el costo del sistema (costo de capital), que es más de tres veces superior al sistema diésel, afectando el costo de capital al inicio del proyecto (año uno). Esta desventaja del sistema de gasificación es sin embargo más que compensada por el bajo precio de la leña como combustible del sistema, reduciendo el costo de operación.

ABSTRACT

The described research in this thesis is based on the hypothesis that woody biomass exists in enough quantities and can be collected in a sustainable way, in rural communities in the state of Yucatan for the production of electricity, achieving technical and economic viability in the long term.

It was determined, through forest inventories and samplings, that the biomass available in the state for productive purposes is 20.29 million m³ of wood. Using computer simulation of firewood consumption using MOFUSS (Modeling Fuelwood Savings Scenario), indicated an increase in biomass in all regions in the modeled period and that, through the introduction of improved wood stoves, there is a saving in the consumption of firewood of 109,000 ton that can be used to generate electricity by gasifying the firewood and meet the electricity needs of 23% of the rural population of the State.

Six species were characterized (*Neomillspaughia emarginata*, *Havardia albicans*, *Croton glabellus*, *Lysiloma latisiliquum*, *Lonchocarpus yucatanensis* and *Senagalia gaumeri*) representative of the vegetation of the deciduous forest of the State of Yucatan by determining its chemical composition and its thermal properties. A high content of extractables (16-27%), a lignin content of (17-24%) and holocellulose (54-63%) of the species studied was obtained, as well as a calorific value between 16.2-18.5 MJ / kg, which makes them suitable for application in thermochemical processes for the generation of energy. The species analyzed show relatively high ash contents, of around 5%, reported normal for tropical species in the literature consulted. The value of the FVI (Fuel Value Index), indicative of the value of the material as fuel, resulted between 2,079 and 3,914, with the highest values for the species *S. gaumeri* and *L. yucatanensis*, due mainly to their higher densities. Furthermore, the kinetic analysis of pyrolysis showed that the species *L. yucatanensis* and *H. albicans* have the lowest values of activation energy, so they require less energy to initiate their thermal decomposition and may be more appropriate in the process of gasification. In the pyrolysis of the samples, at 500 ° C, a carbonaceous fraction (25-30%), a condensable volatile fraction or bio-oil (36-49%) and non-condensable gases (27-34%) were obtained, outcomes related to their chemical compositions. The extractables are related to the production of bio-oil while the lignin is related to the production of the carbonaceous fraction. Based on the composition and thermal properties as well as the

performance of the pyrolysis products, the preference for use of the species in the gasification process would be as follows: *N. emarginata* > *H. albicans* > *C. glabellus* > *L. latisiliquum* > *L. yucatanensis* > *S. gaumeri*.

Based on a system of electricity production by means of gasification (Power Pallet of APL) with a nominal power of 20KW, a preliminary economic modeling of an isolated electrical grid fed with this system was carried out, with positive results. The modeling yields favorable electricity costs in isolated grid, compared to an equivalent diesel internal combustion system, in two modes: with daily operation at 10 hours and with operation at 24 hours. The disadvantage of the gasifier network is the cost of the system (capital cost), which is more than three times higher than the diesel system, affecting the cost of capital at the beginning of the project (year one). This disadvantage of the gasification system is, however, more than compensated by the low price of firewood as fuel for the system, reducing the cost of operation.

INTRODUCCIÓN

Las sociedades modernas, para su funcionamiento, hacen uso de grandes, y crecientes cantidades de energía. Desde la Revolución Industrial, el uso intensivo de energía ha sido indispensable para el progreso de las formas de producción, transporte, comunicación y la búsqueda del confort general. En este proceso histórico, la mayor fuente de energía han sido los combustibles fósiles, que, en la forma de carbón, petróleo y gas natural, han sido depositados en procesos geológicos que almacenaron material orgánico por millones de años [1,2]. El uso excesivo de los combustibles fósiles tiene la desventaja de una dependencia de materiales no renovables, esto es, que una vez usados no son recuperados. Se reporta que para el año 2015 aproximadamente el 80% de la demanda global de energéticos fue satisfecha con combustibles fósiles, en tanto que estos combustibles satisficieron el 90% de la energía consumida en México para el mismo año [3]. Los combustibles fósiles liberan bióxido de carbono (CO_2), un gas de efecto invernadero, y otros contaminantes, al ser utilizados en la generación de los diferentes tipos de energía (térmica, mecánica, etc). El uso masivo (y creciente) de combustibles fósiles a nivel global ha incrementado la concentración de CO_2 en la atmósfera, superando 400 PPM en los últimos años (se ha reportado un promedio mensual de 403.38 PPM en Mauna Loa, Hawái en septiembre del 2017 [4]). Esta concentración creciente de CO_2 está causando un calentamiento general global en el clima, con efectos que son difíciles de predecir y potencialmente perjudiciales a gran escala [5]. En este contexto, para reducir la dependencia y el daño ambiental causado por el consumo de combustibles fósiles y el acicate de sus altos precios (o precios altamente variables), se han desarrollado y refinado tecnologías alternativas para la obtención de energía de otras fuentes como la solar, del viento, geotérmica, biomasa, hidráulica y otras. Estas tecnologías se engloban bajo el término de energías renovables [6].

Se reporta que, en México, en el año 2010, el sector de la generación de la energía eléctrica emite el 28% de las emisiones totales del país de CO_2 , y se considera como un sector con gran potencial de abatimiento [7]. En el año 2012, la electricidad en México era producida en grandes centrales de generación interconectadas en la red eléctrica nacional, por medio de la combustión de hidrocarburos fósiles en un 81% (47% gas natural, 34% otros hidrocarburos fósiles), con el remanente 19% por medio de medios no fósiles, en su gran mayoría proveniente de grandes hidroeléctricas. La meta del sistema eléctrico nacional es

incrementar la participación de fuentes de energía renovable al 35% para el año 2024, y transitar a un sistema distribuido con pequeñas fuentes de generación ampliamente distribuidas en el territorio nacional [8]. De acuerdo con el Banco Mundial, existen alrededor de 1200 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a la electricidad, la mayoría de ellos en áreas rurales y remotas, principalmente en países en desarrollo. El acceso a la electricidad es entonces un reto global que todos los países deben resolver en el futuro [9]. Hogares de bajo ingreso viviendo en áreas rurales sufren de pobreza energética y en consecuencia de bajos niveles de desarrollo humano y económico [10]. Para lograr la electrificación de áreas rurales se requiere considerar tres opciones generales para lograrlo, (i) energías renovables en sistemas isla (off-grid), (ii) mini sistemas que incluyan energía hidráulica o generadores diésel, ó (iii) extensiones de la red nacional [11]. Un esquema integral es necesario para proveer electricidad rural, que considera las diferentes tecnologías renovables que se están volviendo económicamente competitivas, y la adecuada coordinación de los diferentes actores de gobierno y privados involucrados.

La biomasa es la fuente de energía más antigua utilizada por el hombre, y se puede definir como los materiales de origen biológico susceptibles de ser utilizados para obtener energía térmica y eléctrica. La biomasa incluye la leña, materia vegetal, residuos agrícolas y forestales, desechos humanos (incluyendo Residuos Sólidos Urbanos) y desechos animales. La biomasa leñosa en general, en comparación con los combustibles fósiles, emite cantidades menores de azufre, produce menos ceniza y genera mucho menos emisiones a la atmósfera [12]. Las zonas rurales de los países en desarrollo, incluyendo a México, todavía dependen de la biomasa, explotada de manera rústica o tradicional. En México, cerca del 80% de la energía generada a partir de biomasa proviene de leña, la cual es el principal combustible doméstico en las áreas rurales y segundo después del gas en las áreas urbanas. La producción de leña es principalmente de autoconsumo ya que entre el 80 y el 96% de los consumidores recolectan su propia leña [13]. Entre las ventajas del aprovechamiento de la biomasa, como las identifica la Secretaría de Energía [14] se listan:

- Diversificar las fuentes de energía, incrementando la participación de tecnologías limpias (Se le considera un material con emisiones neutrales de carbono, ya que las emisiones causadas al utilizarla fueron extraídas de la atmósfera por medio de la fotosíntesis)
- Incrementar los niveles de eficiencia en el consumo de energía

- Reducir el impacto ambiental del sector energético
- Promover el desarrollo tecnológico y de capital humano para el sector de energía

Además, el aprovechamiento de la biomasa tiene el potencial de beneficiar regiones marginadas rurales, donde se produce material que no tiene utilidad de otra manera o es subutilizado. Los beneficios directos son la producción de combustibles y energía eléctrica en estas regiones geográficas, así como oportunidades de empleo y desarrollo económico.

En el Estado de Yucatán la agricultura comercial y la ganadería han sido los principales promotores de deforestación en las últimas décadas, aunque el resultado neto de estas actividades en conjunto con fenómenos de retorno de las áreas forestales, debido por ejemplo al abandono de henequenales, está en debate. Las regiones forestales del Estado proveen de leña a pobladores, especialmente a los más pobres, que utilizan gas LP o leña como combustible dependiendo de las condiciones económicas variables a las que están sujetos. En las zonas rurales del Estado la recolección de leña para autoconsumo suele ser una indicación de marginalidad [15].

En este trabajo de investigación, como resultado de la revisión bibliográfica y modelaciones de última generación, podemos inferir que existe disponibilidad de biomasa leñosa que pueda utilizarse para usos energéticos. También se llevaron a cabo análisis del material leñoso disponible para describir su capacidad como fuente de energía eléctrica por medio de la tecnología de gasificación. Estos análisis demuestran que el material leñoso disponible en el estado de Yucatán es compatible con el sistema de gasificación, excepto con el especial cuidado de retirar con la frecuencia necesaria las cenizas del material, que es relativamente elevado. Finalmente, en el análisis económico de un sistema de gasificación de 20 kW se demuestra que el sistema es competitivo, como fuente de electricidad en sistema aislado, con un sistema tradicional equivalente que utiliza diésel como fuente de energía.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Situación energética en México

México consumió un total de 9,249 PJ (petajoules) de energía y produjo 7,027 en el año 2017. La distribución del consumo final en los diferentes sectores del país se ilustra en la **Figura 1.1**. Como podemos observar el transporte y el sector industrial son los mayores consumidores de energía del país, con una demanda con tendencia ascendente. En contraste el consumo de energía residencial es muy inferior en comparación y ha tendido a variar poco para el periodo ilustrado. El consumo final de energía se suple por medio de gas natural y condensados (46.8%), petróleo crudo y petrolíferos (38.0%) renovables, incluyendo grandes hidroeléctricas (7.2%) carbón y coque de carbón (6.9) y energía nuclear (1.2 %), [16].

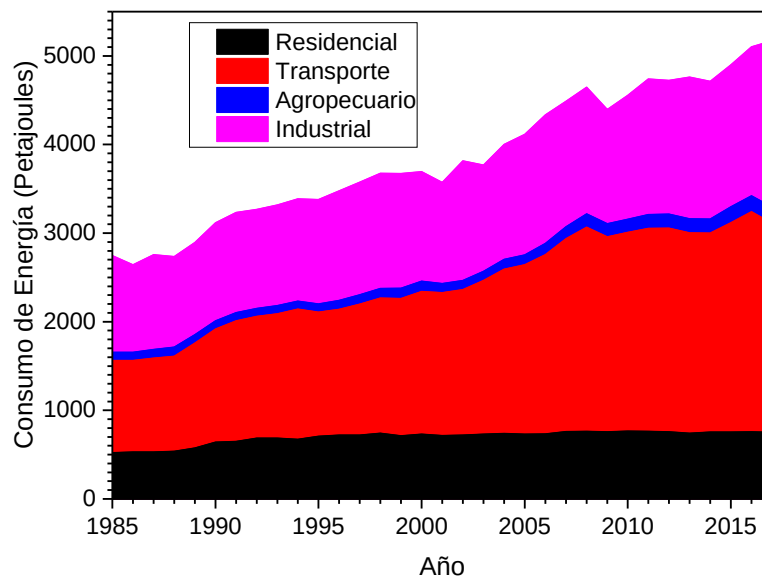


Figura 1.1 Consumo Final de Energía en México por Sectores, 1985-2017, (excluyendo el consumo del sector energético). Construida con datos del Sistema Nacional de Energía, (SIE) [17]

En cuanto a la generación total de electricidad en México, se reporta que de un total de 329,162 GWh (1,184 PJ) generados en el año 2017, el 15.66% fue producido por medio de renovables (hidroeléctrica, eólica, solar y biomasa), el 5.42% por otras fuentes consideradas “limpias” (nuclear, cogeneración eficiente entre otras), y el resto por medio de combustibles fósiles, cómo se ilustra en la **Figura 1.2**.

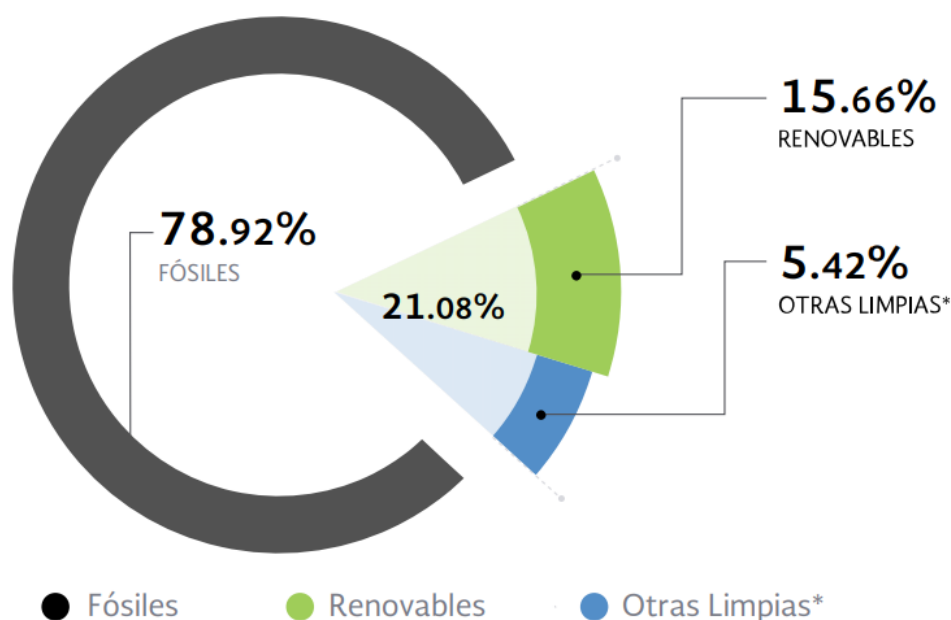


Figura 1.2 Fuentes de generación de energía eléctrica México, 2017 [18]

El acceso limitado a la energía es una expresión de la pobreza, de hogares que tienen limitaciones severas en su capacidad de allegarse de energía para acceder a modos eficaces de cocinar, iluminarse, preservar alimentos y otros servicios o satisfactores modernos. Sin embargo, no existe una manera sencilla de cuantificar la importancia de energía fácilmente accesible para el desarrollo. Aunque los alimentos, el agua limpia, la educación y la salud e higiene son probablemente más importantes, la energía está ligada a todos estos [19].

La pobreza energética en México se ha medido por medio del cálculo de un índice llamado “Pobreza energética en el hogar”, que intenta medirla a nivel nacional y encontrar patrones

geográficos en la misma. Para el caso específico de México y de acuerdo con estimaciones de la Secretaría de Energía, los usos finales de energía más importantes en el sector residencial son: 1) calentamiento de agua, 2) cocción de alimentos, 3) refrigeración, 4) iluminación, 5) Confort térmico (aire acondicionado) y 6) Entretenimiento. Se reportan 11,092,947 hogares (aproximadamente un 37% de un total de 30,266,947) en situación de pobreza energética para el 2012, con carencia especialmente de confort térmico. Se reconoce también que la pobreza energética es especialmente prevalente en el sur del país, en una región que incluye al estado de Yucatán [20]. El CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social), reporta el porcentaje de la población en viviendas con carencia por servicio de electricidad para el país en el año 2015, de 0.9% para todo el país y 1.1% para el estado de Yucatán [21]. Estos porcentajes se traducen en 1,075,776 personas para México (población total del país 119,530,753), y 23,068 personas para el estado de Yucatán (total de 2,097,175) que carecen de electricidad [22].

1.1.1. Energy stacking (Traslape de fuentes de energía)

La viabilidad económica de sistemas de producción de energía eléctrica requiere una revisión del fenómeno llamado *energy stacking*, por el cual las comunidades rurales gradualmente reemplazan de manera parcial el uso de leña por otras fuentes de energía, en diferentes etapas de traslape en diferentes comunidades o segmentos socioeconómicos de la población.

La introducción de estufas de leña de alto rendimiento y combustibles modernos (gas licuado o electricidad) reduce el consumo de leña, reduciendo la presión sobre la capacidad de producción de la región bajo estudio. Sin embargo, se ha encontrado que la sustitución no es total, ocurriendo un traslape donde los hogares no desplazan por completo el uso de leña en fuegos abiertos (o de tres piedras). Este fenómeno es llamado en la literatura como *stacking*, y se debe a diversos factores técnicos y sociales. El fuego tradicional cumple funciones que las estufas mejoradas no están diseñadas para cubrir, tales como iluminación, ahuyentar insectos, calefacción de los espacios, y otras más. Existen también funciones sociales de fuegos abiertos tales como puntos de reunión, prácticas religiosas que pueden ser centrales a la cultura local. En México, estudios de campo han revelado hasta un 67% de ahorro de reducción en el consumo de leña con la adopción de las estufas Patsari (diseño mexicano basado en las estufas Lorena de Guatemala), aunque estufas más avanzadas han tenido dificultades para desplazar a fuegos abiertos. Por otra parte, se

ha documentado que la adopción de estufas Patsari en usuarios mixtos de leña y combustibles avanzados se logra una reducción de consumo de leña del 74%. Se considera por tanto que la promoción de estufas de leña mejorada y de combustibles eficientes en el mismo hogar no debe verse como competición, sino como complementarios en el mejoramiento de la sustentabilidad energética [23].

Se tiene también fuerte evidencia de una correlación entre el consumo de leña y el incremento del nivel de ingreso en las poblaciones. Esta relación se expresa con el concepto de elasticidad del ingreso, donde se expresa el cambio de consumo de leña en respuesta al cambio de nivel de ingreso. En este caso se encuentra, en la mayoría de las veces, que conforme el nivel de ingreso aumenta, el consumo de leña disminuye. Por ejemplo, en Etiopía se ha encontrado que la elasticidad de ingreso para el consumo de leña es de -0.25 (un 1% de incremento representa -0.25% de disminución de consumo de leña), mientras tanto en la India es de -0.7. Por otra parte, el consumo de electricidad tiene una elasticidad de ingreso positiva, por ejemplo, de 0.68 en el Mozambique rural. Sin embargo, la tasa de adopción de tecnologías que mejoren el perfil de sustentabilidad energético en comunidades rurales (desde el punto de vista económico, de salud y ambiental), es uno de los aspectos más difíciles de definir [24].

1.1.2 Tendencias en el consumo de energía residencial en México

El consumo de energía residencial en México representa el 14% de la energía total consumida en el país en el año 2017, un total de 751.6 Petajoules, de los cuales se usaron 250.3 Petajoules en la forma de leña, principalmente para cocinar y calentar agua [25]. En la

Figura 1.3 y Figura 1.4, se puede apreciar que, en los últimos quince años, el consumo de energía producido por leña para uso residencial sigue una tendencia constante a la baja, en tanto el consumo de energía residencial en la forma de electricidad mantiene una fuerte tendencia al alza, afectada solamente por tasas de crecimiento económico [26]. El declive del uso de la leña, es importante en términos de la disponibilidad de este material para otros usos, y la factibilidad de que la extracción de leña sea sustentable (sin superar su capacidad de regeneración).

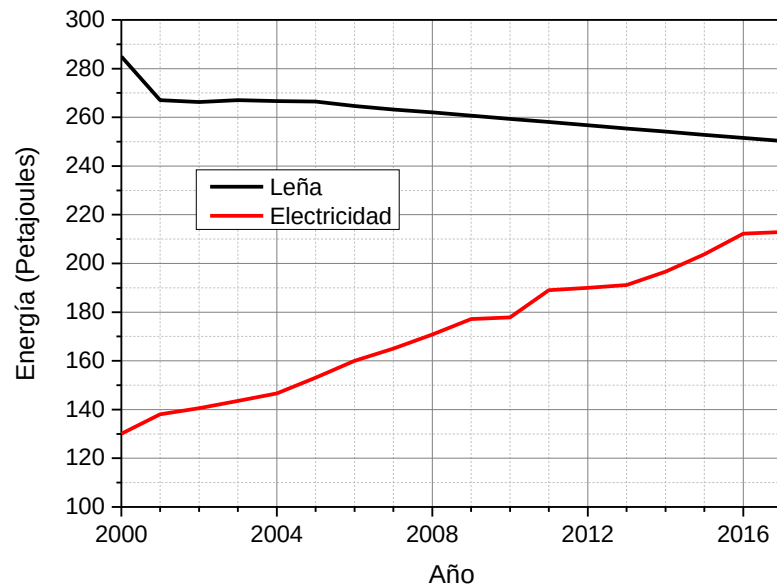


Figura 1.3 Evolución de la energía obtenida por leña y electricidad en los hogares de México, 1998-2017. Construida con datos del Sistema Nacional de Energía, (SIE) [26]

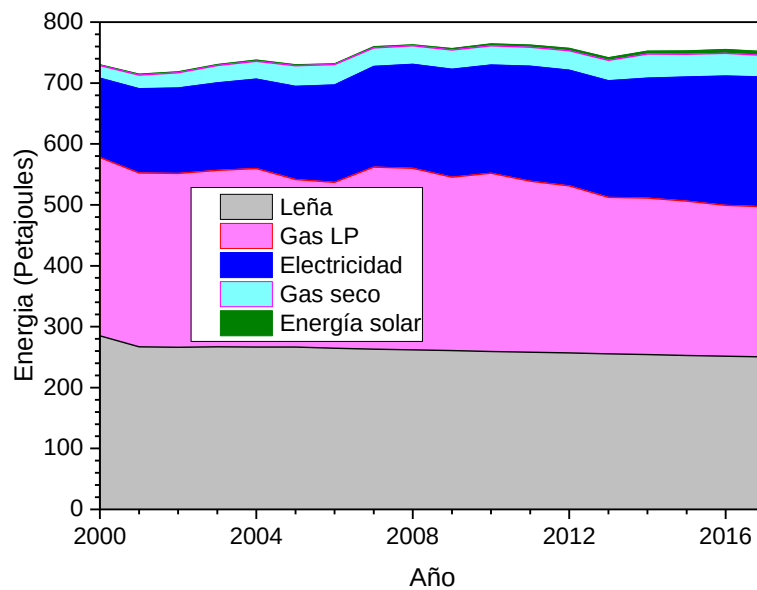


Figura 1.4 Consumo de energía residencial por fuente en México. Construida con datos del Sistema Nacional de Energía, (SIE) [26]

El hogar mexicano promedio cocina con leña, gas LP y con gas natural. Las diferencias regionales en este sentido se ilustran en la **Figura 1.5**, en donde se ha clasificado el sur como “Región tropical”. Es también relevante notar que la zona sur del país, que incluye al estado de Yucatán, los hogares dependen en mayor medida de la leña para cocinar como principal combustible que en otras regiones del país, con el 31.8% de las viviendas, con datos reportados de encuesta del INEGI 2018 [27]. Podemos también notar en esta ilustración la falta de gas natural como opción de combustible en los hogares en la región sur que incluye a Yucatán.

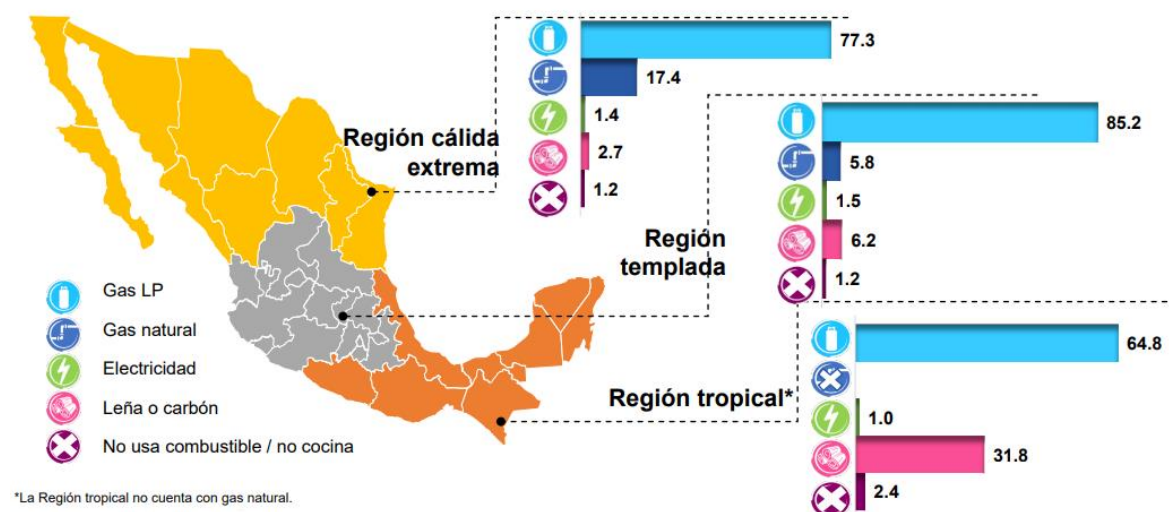


Figura 1.5 Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por tipo de combustible principal para cocinar según regiones climáticas. Fuente: INEGI 2018 [27]

1.2 Evaluación de recursos de biomasa

1.2.1 Vegetación de la Península de Yucatán

La vegetación es el conjunto de árboles y plantas que cubren la superficie del planeta. Cada tipo de vegetación tiene una estructura y composición particular. La Península de Yucatán es una provincia biótica claramente definida, con una biota nativa característica. Según los últimos reportes, existen más de dos mil especies de plantas vasculares en la vegetación que caracteriza a la Península de Yucatán [28]. El término de vegetación potencial, como

lo definió Tüxen, es “el estado hipotético natural de la vegetación que es descrito para el tiempo presente o para cierto tiempo anterior, sustrayendo el impacto humano en la vegetación” [29]. En la Figura 1.6 se muestra el tipo de vegetación potencial de la Península de Yucatán, de elaboración propia, basado en Rzedowski [30], en donde se aprecia que el Estado de Yucatán tiene una cobertura potencial de selva mediana subcaducifolia y selva baja caducifolia.

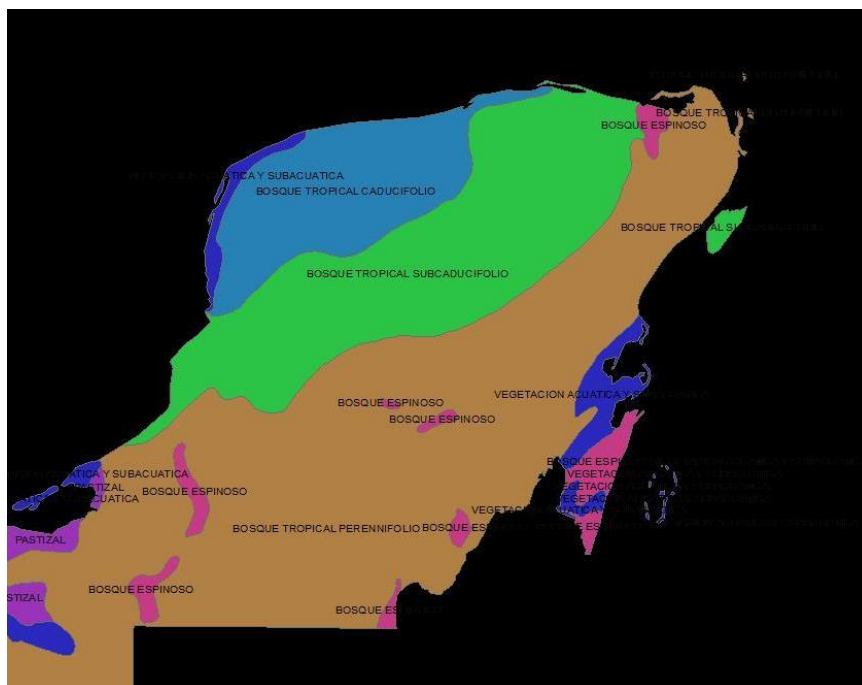


Figura 1.6 Tipos de Vegetación Potencial en la Península de Yucatán. Elaboración propia, basado en [30].

Selva mediana subcaducifolia: Se distribuye en el oriente del Estado de Yucatán, el norte de Campeche y una pequeña parte de Quintana Roo. Este tipo de vegetación es el segundo más importante de la península, de acuerdo con la extensión que originalmente ocupó. Se presenta en zonas con climas Aw_1 , cálido subhúmedo con lluvias en verano, con precipitaciones de 1,000 a 1,200 mm. Este tipo de selva está caracterizada por árboles que miden entre 13 y 18 metros de altura, de los cuáles del 50 al 75% pierden sus hojas durante la época seca. Especies comunes incluyen al ya'ax nik (*Vitex gaumeri*), ramón (*Brosimum*

alicastrum), jabón (*Piscidia piscipula*), pich (*Enterolobium cyclocarpum*), ya'ax che (*Ceiba pentandra*), y el cedro (*Cedrela odorata*).

Selva baja caducifolia: Se establece en lugares con climas Aw_0 , cálido, el menos húmedo de los climas clasificados como húmedos. Esta selva se encuentra en la parte norte y noroeste del estado de Yucatán y parte del norte del estado de Campeche. En su extensión original era el tercer tipo de vegetación más importante de la península. En estas selvas casi todos los árboles pierden sus hojas en temporada seca, presentando dos aspectos estacionales de coloración, el gris o café de temporada de secas y el verde brillante en temporada húmeda. Este tipo de vegetación tiene una comunidad arbórea densa con individuos de 8 a 10 metros de altura, con troncos delgados y retorcidos, la mayoría con un diámetro inferior a los 10 cm. Las especies más abundantes son el box kaatsim (*Senegalia gaumeri*), chimay (*Acacia pennatula*), sak kaatisim (*Mimosa bahamensis*), chucum (*Havardia albicans*), y el tsiitsil che (*Gymnopodium floribundum*) [31].

Es importante notar que la composición de especies de selvas con estas clasificaciones en diferentes áreas geográficas puede ser muy diversa y no comparable. Diferencias en vegetación sobre grandes extensiones de selva están asociadas a gradientes de clima regionales o a diferencias en el sustrato de suelo. En contraste con otras regiones cubiertas con este tipo de vegetación, en el caso de la Península de Yucatán se tiene un sustrato uniforme de piedra caliza, lo cual ofrece oportunidades de investigar diferencias debidas a gradientes del clima y tipos de suelo [32].

1.2.2 Vegetación en el Estado de Yucatán

En Yucatán, predomina un relieve de llanuras y lomeríos con escasas variaciones en altura, con climas cálidos y secos. El sustrato geológico consiste principalmente de rocas sedimentarias y suelos aluviales que dan origen a siete diferentes tipos de suelo, donde se han desarrollado ecosistemas de selvas y de otras áreas forestales. Sus características afines, permiten agruparlas en cinco formaciones forestales como se señala en el “Inventario Estatal Forestal y de Suelos del Estado de Yucatán 2013” [33]. Estas formaciones forestales son:

- Selvas altas y medianas
- Selvas bajas
- Manglar

- Otras asociaciones
- Otras áreas forestales

Las superficies ocupadas por estas formaciones forestales en el Estado de Yucatán se muestran en la **Figura 1.7**. El estado comprende una superficie continental total de 3,918,934 hectáreas, de las cuales 3,094,633 hectáreas (78.97% de territorio) se consideran como áreas forestales; mientras que las áreas no forestales ocupan 824,301 hectáreas. Estas últimas incluyen áreas agrícolas, pastizales, asentamientos humanos, cuerpos de agua y áreas desprovistas de vegetación. En el desarrollo de la vegetación se distinguen dos estados sucesionales: la vegetación primaria, que no presenta alteración alguna y la vegetación secundaria, que presenta indicios de haber sido eliminada o perturbada a tal grado que se ha modificado sustancialmente. Para la superficie forestal de estado, sólo 4.39 % se encuentra en una condición primaria, y el restante 95.61 % se encuentra en una fase secundaria.

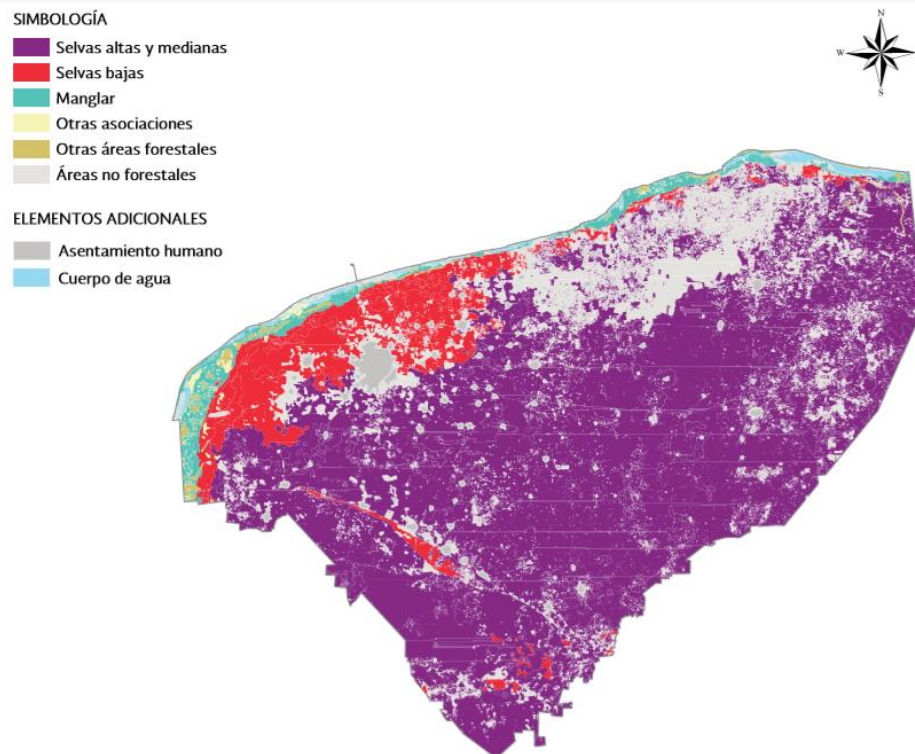


Figura 1.7 Distribución de formaciones forestales del Estado de Yucatán [33]

La proporción en que el área forestal se divide entre las diferentes formaciones forestales, se ilustra en la **Figura 1.8** mientras que en la **Tabla 1.1** se muestra la superficie forestal que ocupan. Las selvas medianas y bajas representan el 84 y 11.6%, respectivamente, del total de área forestal del Estado y cubren un total de 2,957 mil ha.

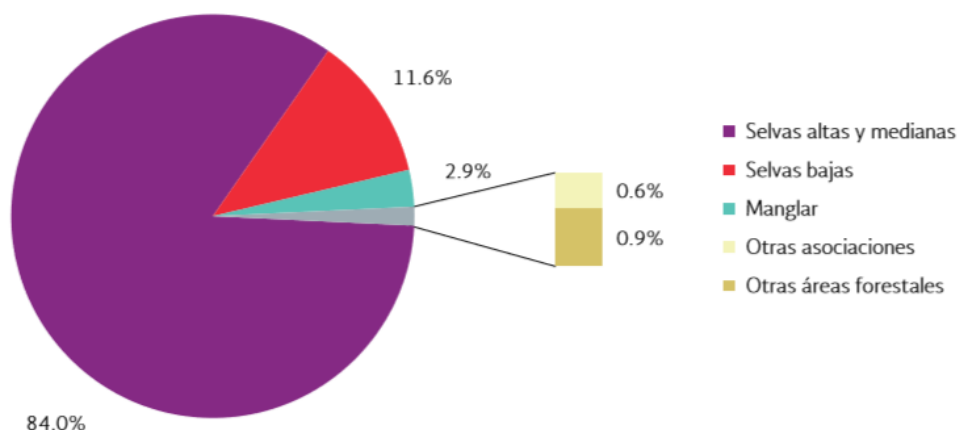


Figura 1.8 Áreas de las formaciones forestales del Estado de Yucatán [33].

Tabla 1.1 Superficie forestal del Estado de Yucatán en Hectáreas [33].

Formación	Estado Sucesional	Superficie
Selvas altas y medianas	Primaria	9,665.90
	Secundaria	2,588,984.95
Selvas bajas	Primaria	1.84
	Secundaria	358,764.13
Manglar	Primaria	80,080.55
	Secundaria	10,890.41
Otras asociaciones	Primaria	17,209.32
Otras áreas forestales	Primaria	29,035.46
Áreas no forestales		824,301.43
Superficie total		3,918,934.00
Superficie forestal	Primaria	135,993.08
	Secundaria	2,958,639.49

Selvas altas y medianas.

En Yucatán, esta formación sólo presenta selvas medianas, cubriendo una superficie que representa 66.3 % de la superficie estatal; sin embargo, debido a la tala repetida de la vegetación, actualmente se encuentra perturbada en 99.6 %, lo cual se refleja en la composición florística predominando especies secundarias, como son las de los géneros *Bursera*, *Piscidia*, *Lysiloma* y *Caesalpinia* (**Tabla 1.2**). Se ha observado la dominancia de especies leguminosas arbóreas y arbustivas, pues son las mejor adaptadas a la perturbación, ocasionada por la tala repetitiva del arbolado, frecuentes incendios y fuertes vientos en la época de huracanes. Como resultado, en las selvas de esta formación predomina el arbolado joven de porte bajo, con una altura media de 9.0 metros y diámetro de 11.8 centímetros; por lo cual, aunque la densidad se estima en alrededor de 829 árboles/ha, el volumen también es bajo, estimándose en 59.94 m³/ha. Así mismo, no obstante que las existencias de madera son bastante considerables, estimándose en 155,763,132.25 m³ RTA, las especies y las dimensiones del arbolado no son atractivas para su aprovechamiento comercial; sin embargo, son muy importantes para satisfacer las necesidades domésticas de las comunidades rurales establecidas en estas zonas selváticas.

Tabla 1.2 Frecuencia de las especies en las formaciones de Selva Mediana y Baja en el Estado de Yucatán, [33]

Especie	Frecuencia (%) por Tipo de Formación	
	Selva Mediana	Selva Baja
<i>Bursera simaruba</i>	17.5	12.8
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	11.1	5.6
<i>Piscidia piscicula</i>	11.5	6.8
<i>Caesalpinia gaumeri</i>	6.3	9.2
<i>Lonchocarpus xuul</i>	5.7	--
<i>Coccoloba barbadensis</i>	5.1	--
<i>Pithecellobium albicans</i>	4.5	6.5
<i>Gymnopodium floribundum</i>	3.7	2.4
<i>Vitex gaumeri</i>	3.1	--
<i>Thouinia paucidentata</i>	3.0	3.7
<i>Laguncularia racemosa</i>	--	8.0
<i>Haematoxylum campechianum</i>	--	4.1
<i>Erythroxylum rotundifolium</i>	--	2.5
Otros	28.4	38.4

Las selvas medianas se clasifican en:

Selva mediana subperennifolia (SMQ). Esta selva se caracteriza porque su vegetación conserva su follaje todo el año, a excepción de algunas especies que tiran las hojas en la época seca del año, como *Bursera simaruba* (chaká, palo mulato), *Piscidia piscipula* (jabín), y *Lysiloma latisiliquum* (tzalam), entre otras. Este tipo de vegetación cubre una buena parte de la superficie del estado, principalmente en la parte sur y centro. Desarrolla diferentes estratos o niveles de vegetación, el arbóreo (que tiene hasta tres rangos de altura), el arbustivo y el herbáceo; presenta además plantas epífitas. El estrato arbóreo lo conforman árboles que presentan una altura media de 15 a 20 metros.

Selva mediana subcaducifolia (SMS). La característica distintiva más importante es que más de la mitad de sus elementos florísticos, y a veces tres cuartas partes de los árboles altos de esta selva, pierden completamente sus hojas en la época de sequía, ya que comparten muchas de las especies con la selva baja caducifolia. Se le puede considerar como la comunidad vegetal de más importancia en la entidad, ya que además de ser la que cubre más superficie, contiene la mayor riqueza específica de especies. Los árboles alcanzan una altura de entre 12 a 15 metros, algunos de los cuales pueden llegar hasta 20 metros.

Selva mediana caducifolia (SMC). Los árboles tienen una altura de 10 a 20 metros aproximadamente, y dejan caer sus hojas de 50 a 75 % durante la época seca del año, esto hace que los suelos donde prosperan formen una capa esponjosa de hojarasca; la pedregosidad es también otra propiedad del suelo, la cual es un factor que propicia el establecimiento de este tipo de vegetación.

Selvas Bajas.

Las selvas bajas de Yucatán cubren una superficie de 362,389.29 hectáreas, las cuales representan 9.2 % de la superficie estatal; en cuanto al estado de conservación de estas comunidades, la vegetación primaria casi ha desaparecido, encontrándose sólo en pequeños relictos del municipio de Tekax. Dado que la vegetación se encuentra en una fase sucesional secundaria arbustiva pionera y arbórea temprana, en la composición florística predominan especies secundarias de rápido crecimiento, como son las de los géneros *Bursera*, *Caesalpinia*, *Piscidia* y *Pithecellobium*. En estas selvas el porte del arbolado es bajo, ya que en promedio presenta una altura de 6.9 m y un diámetro de 12.1

cm; así mismo, la densidad del arbolado se estima en alrededor de 515 árboles/ha, lo cual arroja un volumen también muy bajo de casi 59.94 m³/ha. Por lo anterior, aunque las existencias de madera no son despreciables, estimándose en 10,704,979.63 m³, las especies y las dimensiones del arbolado no son atractivas para su aprovechamiento comercial; sin embargo, proporcionan muchos productos, como leña y postes, necesarios para cubrir las necesidades domésticas de la población rural establecida en las comunidades de esta formación. Los municipios con mayor cantidad de existencias reales son Hunucma, Mérida, Tetiz, Kinchil, Progreso, Motul y Celestún, donde se concentra 51 % del volumen estimado para la selva baja.

Las selvas bajas se clasifican en:

Selva baja espinosa subperennifolia (SBQ). Esta comunidad es una variante de las selvas subperennifolias de la península de Yucatán. Se caracteriza por desarrollarse en zonas inundables y la baja altura de sus árboles, con promedio es de siete metros, de los cuales 50 % pierden el follaje en la época seca; la alta densidad de los árboles causa una fuerte disminución de plantas trepadoras y epífitas; asimismo, debido a las constantes inundaciones, el estrato herbáceo frecuentemente no existe. Se distribuye en pequeños manchones al norte Yucatán, generalmente en zonas de clima seco; se le encuentra en terrenos bajos y planos con drenaje deficiente, mismos que se inundan en la época de lluvias, pero se secan totalmente en invierno. Los suelos que soportan a esta selva son relativamente profundos, con una lámina de agua más o menos somera en época de lluvias.

Selva baja caducifolia (SBC). Se distribuye ampliamente en el estado, desarrollándose en zonas donde predominan los climas semisecos o subsecos y los cálidos subhúmedos. Las especies del arbolado de esta selva son caducifolias y presentan alturas bajas, generalmente de 5 a 10 metros y muy eventualmente de hasta 15 metros o un poco más. El estrato herbáceo es bastante reducido y sólo se puede apreciar después de que ha empezado claramente la época de lluvias y retoñan o germinan las especies herbáceas, observándose la presencia de pastizales de gramíneas nativas, así como de especies inducidas.

Selva baja espinosa caducifolia (SBK). Se desarrolla en climas similares a los de la selva baja caducifolia o ligeramente más secos. Los árboles dominantes de esta comunidad son especies leguminosas, generalmente espinosos y caducifolios en la época seca; el arbolado

presenta un porte bajo, con alturas de 5 a 10 metros y eventualmente llegan a alcanzar 12 metros. También se distingue un estrato arbustivo de 2 a 4 metros de alto, bien desarrollado, pero falta casi completamente el estrato herbáceo.

Selva baja subcaducifolia (SBS). Esta selva es muy semejante a la selva baja caducifolia, excepto en que los árboles dominantes conservan por más tiempo el follaje a causa de una mayor humedad en el suelo. Sólo se distribuye al poniente del Estado.

Zonificación forestal del Estado de Yucatán

La zonificación forestal es un instrumento para identificar, agrupar y ordenar los terrenos forestales por sus funciones ambientales, socioeconómicas y otras con el objetivo de propiciar una mejor administración de los recursos y contribuir al desarrollo forestal sustentable. Se rige por los artículos 13 y 14 del Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y sus criterios metodológicos están basados en el acuerdo publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 30 de noviembre de 2011, en concordancia a la metodología, criterios y procedimientos establecidos por la SEMARNAT y la CONAFOR.

La zonificación forestal comprende tres categorías:

- 1.- Zonas de conservación y aprovechamiento restringido o prohibido
- 2.- Zonas de producción
- 3.- Zonas de restauración

En la **Figura 1.9** se muestra el mapa de zonificación forestal del Estado de Yucatán y en la **Tabla 1.3** las superficies que ocupan cada zona. La superficie de producción predomina en el estado, cubriendo el 65.9% de la superficie total, siendo la selva mediana la que predomina en esta superficie de producción.

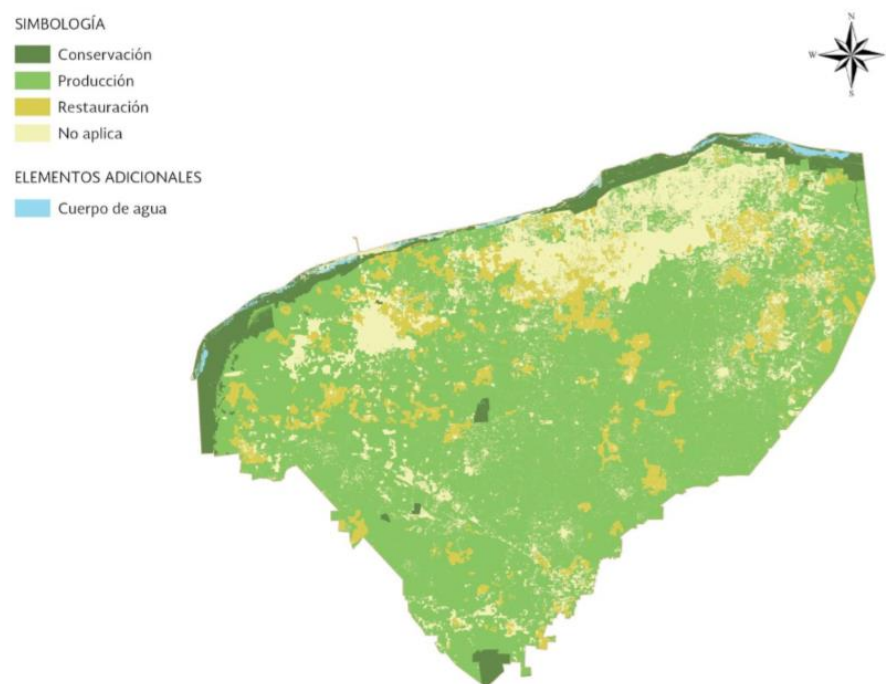


Figura 1.9 Mapa de Zonificación Forestal del Estado de Yucatán [33]

Tabla 1.3 ZONIFICACIÓN FORESTAL DEL ESTADO DE YUCATÁN [33]

Categoría de zonificación	Superficie (ha)
Conservación	216,497.90
Producción	2,584,796.97
Restauración	379,765.75
No aplica	737,873.39
Total	3,918,934.01

1.2.3 Disponibilidad de material leñoso

Aunque los datos anteriores señalan el potencial del Estado de Yucatán como fuente de biomasa leñosa, es necesario determinar cuál es la capacidad de los sistemas ecológicos del Estado de Yucatán, para proveer el material leñoso, de manera sustentable, en términos de peso (o volumen) a sustraer por periodo de tiempo por unidad de superficie, y de este modo determinar la factibilidad y escala de un sistema de gasificación para la producción de electricidad. Para determinar la capacidad de extracción se pueden usar métodos de muestreos y análisis de áreas designadas de monte, pero esto puede resultar

prohibitivamente caro y práctico solamente a largo plazo, por lo que se utilizan métodos indirectos.

El análisis de imágenes de satélite, utiliza métodos de interpretación y de análisis geográfico (GIS), para determinar la composición arbórea y el estado de sucesión por medio de imágenes satelitales [34]. Otro método, es el utilizado con ecuaciones alométricas, aplicadas en mediciones en superficies de vegetación de la península de Yucatán. Es estos trabajos se cuantifica la cantidad de biomasa que se encuentra por encima del suelo (AGB = Above Ground Biomass), en diferentes estados de sucesión de la vegetación de la península [35]. Estos estudios determinan un valor del AGB en Mg/ha, que tiene una relación con el material disponible para gasificación.

También se pueden usar valores de la Productividad Primaria Neta (PPN) de un ecosistema, que es la capacidad de este de convertir energía lumínica solar (por medio de fotosíntesis) en materia orgánica adicional a la previamente existente. La PPN se divide a su vez en Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), que corresponde a las partes aéreas de las plantas, y en Productividad Primaria Neta Subterránea (PPNS) o productividad del bajo el suelo (sistema de raíces).

Huechacona [36] realizó estudios de dinámica de flujos de carbono debido a las existencias y dinámicas de la vegetación en la reserva Kaxil-Kiuic, situada en la región sur del Estado de Yucatán (municipio de Oxkutzcab). La reserva cubre una superficie de 1,642 hectáreas y está dominada por bosques tropicales semi-decíduos estacionalmente secos (50%-75% de especies que pierden sus hojas durante la estación seca), clasificada como selva mediana subcaducifolia, de diferentes edades de abandono después de un uso de agricultura tradicional con el método de roza-tumba y quema. El bosque tiene una estatura de dosel relativamente baja (8-13 m) con unos pocos árboles prominentes que alcanzan 15-18 m, los más maduros de 80-100 años de edad. Se obtuvieron promedios de 115.21 ton/ha de materia orgánica aérea, siendo 106.28 ton/ha el promedio para materia viva y 8.93 ton/ha para materia muerta. Entre las especies que más contribuyeron a la biomasa aérea total, así como las categorías de edad y pendiente están *Bursera simaruba*, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia gaumeri* y *Piscidia piscipula*, entre otras, que se concluye podrían ser materia prima potencial para la obtención de bioenergía en general [37]

Otra fuente de información sobre la disponibilidad de biomasa leñosa es la SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), que incluye los estudios para el establecimiento de “programas de manejo para el aprovechamiento de recursos forestales maderables”, en los que realizan un *diagnóstico general de las características físicas y biológicas de las superficies (clima, suelo, topografía, hidrología, tipos y estructura de la vegetación y especies dominantes de flora y fauna silvestres) así como estudios dasométricos de las existencias volumétricas, densidades promedio, incrementos, edad y turno de aprovechamiento y diámetro de corta, por unidad mínima de manejo y por especie* [38].

Por otra parte, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) realiza estudios nacionales de cuantificación de recursos forestales. a través del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, así como del levantamiento de variables de Combustibles Forestales que aportará información esencial para generar índices y modelos que permitan realizar de una forma más eficiente procesos de planeación y ejecución de actividades de Protección Contra Incendios Forestales y Manejo de Fuego [39]. Los trabajos de cuantificación de combustibles forestales pueden ser utilizados para deducir la capacidad de extracción en áreas boscosas del país. De especial interés, es el material leñoso caído y los árboles muertos en pie, que pueden ser extraídos para ser utilizados como combustible, con mínimo impacto al bosque, y reduciendo el material disponible para incendios no controlados [40].

El material leñoso caído (MLC) se divide en:

- Troncos, leños y ramas
- MLC firme
- MLC podrido
- Tocones

Se ha encontrado también como relevante un índice llamado el Incremento Medio Anual en volumen (IMA), que es una medida que indica la productividad por unidad de tiempo y por unidad de área de un tipo de vegetación en particular. Para encontrar el IMA en regiones de Yucatán, se usan los datos de los Estudios Regionales Forestales llevadas a cabo en las unidades geográficas denominadas UMAFOR (Unidad de Manejo Forestal), publicados para el Estado [41]. Así, por ejemplo, la UMAFOR 3102 [42] que incluye a los municipios de Cantamayec, Chacsinkin, Chapab, Chinikindzonot, Chumayel, Mama, Mayapan, Peto, Tahdziu, Teabo, Tekit Y Tixmehuac, tiene una superficie total de 333,638.52 Ha y 75,042

Habitantes. Se considera que la población de esta región tiene un elevado consumo de leña y prácticas ilegales realizadas por los carboneros por tala clandestina., Con base a los datos de inventario (Inventario Nacional Forestal) y de los Conglomerados Dasométricos de la UMAFOR 3102, se obtuvieron los valores de IMA para tres escenarios como se muestra en la **Tabla 1.4** así como producción estimada en forma sustentable (retiro anual del 15% del volumen de la madera presente por hectárea) para cada municipio (**Tabla 1.5**). Los municipios de Peto y Tahdziu presentan más del 50% del total estimado para la UMAFOR 3102.

Tabla 1.4 Estimación del Incremento Medio Anual, de la UMAFOR 3102, [42]

Nivel de Productividad	EXISTENCIAS	Edad	IMA
	M ³ /ha	Años	M ³ /ha por año
BAJO	20.00	15	1.33
MEDIO	30.00	15	2.00
ALTO	40.00	15	2.67

Tabla 1.5 Producción estimada en caso de estar bajo manejo forestal sustentable, de la UMAFOR 3102, [42]

Municipio	Volumen Promedio (m ³ /ha)	Superficie Vegetación (ha)	Zonas de Producción Alta (ha)	Existencias Reales Totales (m ³)	Intensidad de Corte (15%) Estimada (m ³)
Cantamayec	16.75	33,142.2	21,878.2	366,507.2	54,976.1
Chacsinkin	34.27	10,357.7	1,955.9	67,029.5	10,054.4
Chapab	10.07	14,680.3	42.5	428.2	64.2
Chikindzonot	28.22	37,774.0	98.5	2,780.5	417.1
Chumayel	3.94	7,568.2	0.0	0.0	0.0
Mama	3.95	9,120.2	10.0	39.5	5.9
Mayapan	19.45	8,146.5	0.0	0.0	0.0
Peto	35.67	87,967.3	14,176.9	505,741.8	75,861.3
Tahdziu	37.49	22,418.1	14,117.2	529,306.1	79,395.9
Teabo	15.36	19,946.3	2,747.8	42,199.8	6,329.9
Tekit	12.78	25,781.7	0.0	0.0	0.0
Tixmehuac	22.73	21,395.9	10,935.2	248,594.3	37,289.1
Suma Total		298,298.3	65,962.4	1,762,627.0	264,394.0

La extracción de madera de una superficie arbolada, para fines energéticos, puede tener diferentes intensidades (e impactos), como se expresa de menor a mayor a continuación:

- a) Recolección de ramas caídas de los árboles. En este caso no se altera la estructura y función esenciales del bosque, por lo que la producción de combustible se puede asumir como relativamente estable y constante.
- b) La recolecta incluye el corte de ramas verdes de los árboles, afectando la estructura y funcionamiento de la vegetación. En este caso se abren claros y se modifica el micro-clima de la selva. La regeneración natural puede recuperarlas condiciones previas a la colecta, siempre y cuando se reduzca la presión extractiva.
- c) Se utiliza árboles completos, alterando la estructura y función de la porción de bosque, abriendo oportunidades a las especies herbáceas y arbustivas inútiles como fuente de leña. El agotamiento de las especies preferidas como leña promueve el corte de otras especies, propiciando un proceso destructivo de la selva o bosque [43].

1.2.4 Uso de leña en el Estado de Yucatán

El uso tradicional de la leña en el Estado de Yucatán tiene un bajo impacto ambiental, ya que se recogen solo las ramas secas caídas. Esta extracción es de gran importancia económica en las áreas rurales del Estado, ya que provee combustible, esencialmente para cocinar, y es la única opción de combustible para algunas comunidades. La recolección de estas ramas caídas también tiene el beneficio de prevenir incendios naturales. La extracción y el uso de la leña en estas comunidades suele hacerse localmente, con distancias entre el punto de recolección y el punto de utilización de 3.8 a 5 km. Las especies arbóreas que producen leña se clasifican, dependiendo de dónde se encuentran, en especies de monte y milpa, de traspato y de áreas públicas o mixtas. Entre las especies arbóreas productoras de leña muy abundantes en áreas de monte se encuentran el Tzalam (*Lysiloma latisiliquum*), el Habín (*Piscidia piscipula*), el Kitinché (*Caesalpinia gaumeri*), el Chucum (*Havardia albicans*) y el Chacá (*Bursera simaruba*) [44].

En un estudio reciente (2010), se analizó el patrón de preferencias de leña combustible en 1,153 viviendas de seis comunidades, cinco de las cuáles se encuentran en la región de vegetación potencial de selva baja caducifolia del Estado de Yucatán, en su región

noroeste. Se encontró que las localidades de estudio presentan heterogeneidad en la composición florística y su distancia a la capital del Estado, factores que modifican las preferencias y hábitos de consumo. Se estableció un promedio de consumo que oscila en 1.26 y 2.89 kg/día/habitante. La leña se extrae de terrenos vecinos, milpas o patios; con una distancia promedio de recolección de 3.8 km. La leña se recolecta de preferencia seca desprendida o en pie, debido a su menor peso y facilidad de combustión. Se encontró que 41 son las especies más usadas como combustible, pero las principales son: *Senegalia gaumeri*, *Havardia albicans*, *Lysiloma latisiliquum*, *Gymnopodium floribundum*, *Bursera simaruba*, *Caesalpinia gaumeri*, *Conocarpus erectus* y *Piscidia piscipula*, debido a su mayor abundancia, fácil encendido, duración en el fuego y/o baja emisión de humo [45]

Es, sin embargo, importante notar que el uso tradicional de la leña en el medio rural para cocinar tiene potencialmente efectos nocivos en la salud de las personas expuestas a las emisiones de contaminantes resultantes. Esta forma de uso de la leña está asociada al incremento de la incidencia de infecciones respiratorias, incluyendo neumonía, tuberculosis y enfermedad crónica pulmonar obstructiva, bajo peso de infantes al nacer, cataratas, eventos cardiovasculares afectando tanto a adultos como infantes. Los mecanismos por los cuáles estos efectos se manifiestan no son comprendidos en su totalidad [46]. Nuevas estufas eficientes reducen el consumo de leña y la exposición de la población a los contaminantes de combustión [47]. En este contexto, la reducción en consumo de leña facilita la opción de su utilización para un sistema de producción de energía eléctrica por medio del uso de leña como el propuesto.

1.2.5 Modelación con Sistemas de Información Geográfica

Se han realizado trabajos de modelación usando sistemas de información geográfica sobre la disponibilidad de biomasa leñosa tales como el WISDOM (siglas *Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping*) y más recientemente el MOFUSS (*Modelling Fuelwood Savings Scenario*) [48].

WISDOM recolecta y analiza información relativa al uso de leña para fuego. La integración de funciones de producción y consumo de leña, al nivel de municipios, permite identificar áreas bajo presión (hotspots), donde el consumo presiona a la producción en valores no sostenibles. Esta información también se traduce en emisiones netas de CO₂ debido a la

quema de leña. Del estudio llevado a cabo bajo la metodología de WISDOM, publicado en 2006 se encuentran las siguientes características del uso de la leña en México:

- El uso de la leña supera en tres veces la recolección de maderas comerciales y representa el 50% de la demanda de energía residencial en el país.
- La demanda de leña se encuentra concentrada en zonas rurales. La mayoría de la leña es recolectada o comprada en mercados locales para su uso en hogares.
- La mayoría de la leña proviene de áreas forestales, con relativamente poca recolección ocurriendo en terrenos agrícolas.
- El uso de residuos agrícolas o estiércol como combustible no es extendido.

Este estudio encontró en sus resultados 267 municipalidades de alto interés, agrupados en 16 áreas (*clusters*) [48]. Se encontró que, aunque el balance nacional de leña para combustión es positivo para el año 2000 (165 Tg y⁻¹), estas 16 áreas agrupan municipios que tienen balances negativos, con el consumo superando la producción de leña. El Estado de Yucatán aparece en este estudio como el estado con mayor 'área de municipios con balances negativos (33% del área del estado, cubriendo 37 municipios) [49].

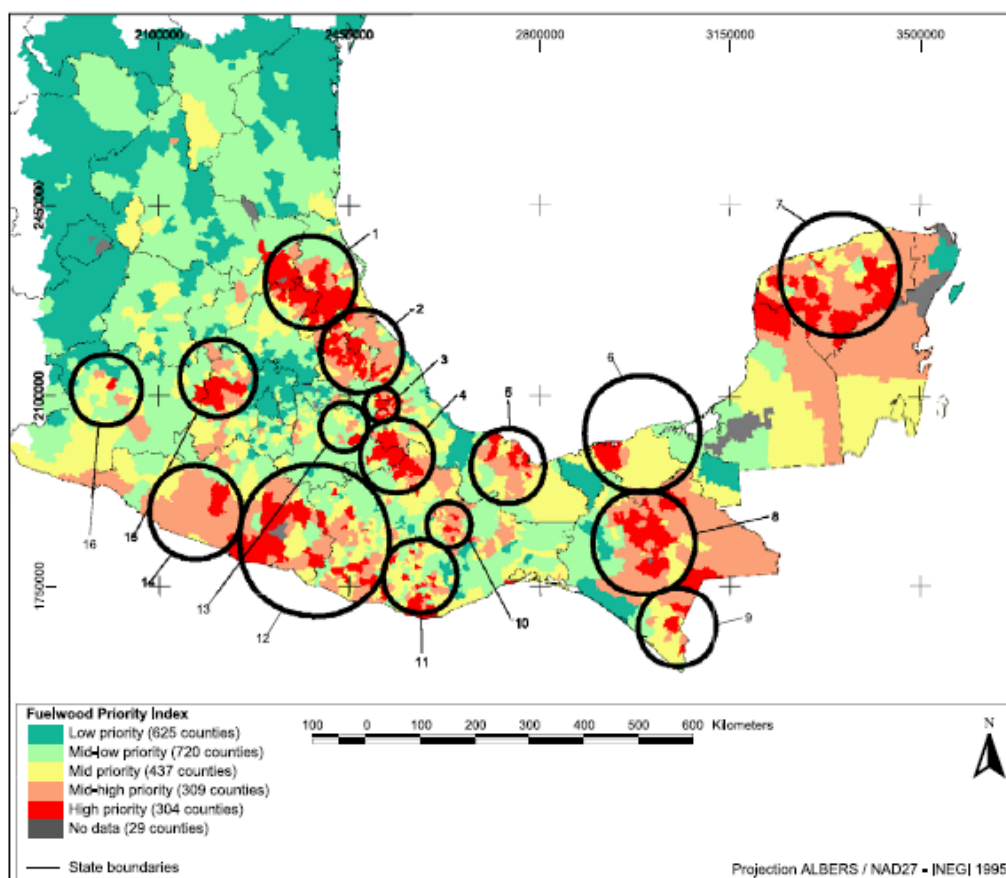


Figura 1.10 Áreas de alta prioridad, incluido municipios del norte y centro de Yucatán, [49]

MOFUSS (*Modelling Fuelwood Savings Scenario*), está diseñado para modelar el impacto en regiones del uso de leña como combustible, sin intervención para el ahorro de leña (llamado escenario BaU, de *Business as Usual*) y el efecto de introducir estufas de leña eficientes (llamado ICS de *Improved Cooking Stoves*). La primera versión MOFUSS fue desarrollada entre septiembre 2011 y abril 2015. MOFUSS es un sistema multiusuarios, desde académicos a ONGs, que se puede utilizar para:

- a) Realizar estimados más consistentes de ahorros de carbono relacionados con la leña en sus áreas de interés,
- b) Proporciona instrumental en la planeación de proyectos de intervención efectivos y eficientes en costos

Como se detalla en un artículo de reciente publicación [50], MOFUSS realiza las siguientes tareas:

- Modela la extracción de leña “no renovable” (tasas excediendo la tasa de recuperación)
- Crea un modelo dinámico que simula el efecto espacio-temporal de la recolección de leña
- Modela ahorros por intervenciones que causan reducción de consumo, tales como estufas mejoradas de leña
- Incorpora incertidumbre en el modelaje geoespacial

MOFUSS integra la incertidumbre de los parámetros de entrada con una función de simulación Monte Carlo (MC). De este modo integra la incertidumbre de patrones de crecimiento y acumulación de biomasa. Con cada corrida de MC los parámetros de crecimiento varían aleatoriamente siguiendo funciones de densidad probabilística normal truncada. MOFUSS opera con Freeware DINAMICA EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) diseñado para modelos complejos con componentes espaciales. Usando lenguaje dataflow se construyen modelos y son mostrados en diagramas (**Figura 1.11**). El script de DINAMICA EGO se traduce en procesos externos en R, Ffmpeg y LaTeX que re-muestran, rasterizan y llevan a cabo análisis estadísticos generando gráficos, mapas animados y un reporte resumido en pdf.

MOFUSS consiste en cuatro módulos o componentes:

- 1.- Un componente de fricción que crea mapas de impedancia
- 2.- Un algoritmo de distancia inversa ponderada (IDW) que crea mapas de presión
- 3.- Un componente de oferta/demanda que proyecta la cantidad esperada de leña a ser cosechada en cada intervalo de tiempo en cada pixel y la respuesta de la vegetación a la perturbación, y
- 4.- Módulo de pérdida o ganancia de bosques que proyecta eventos de remoción de bosques o ganancia en superficie de bosques en cada intervalo de tiempo, basado en observaciones pasadas

Estos módulos, sus operaciones y el flujo de información entre los mismos, se ilustra en la **Figura 1.11**.

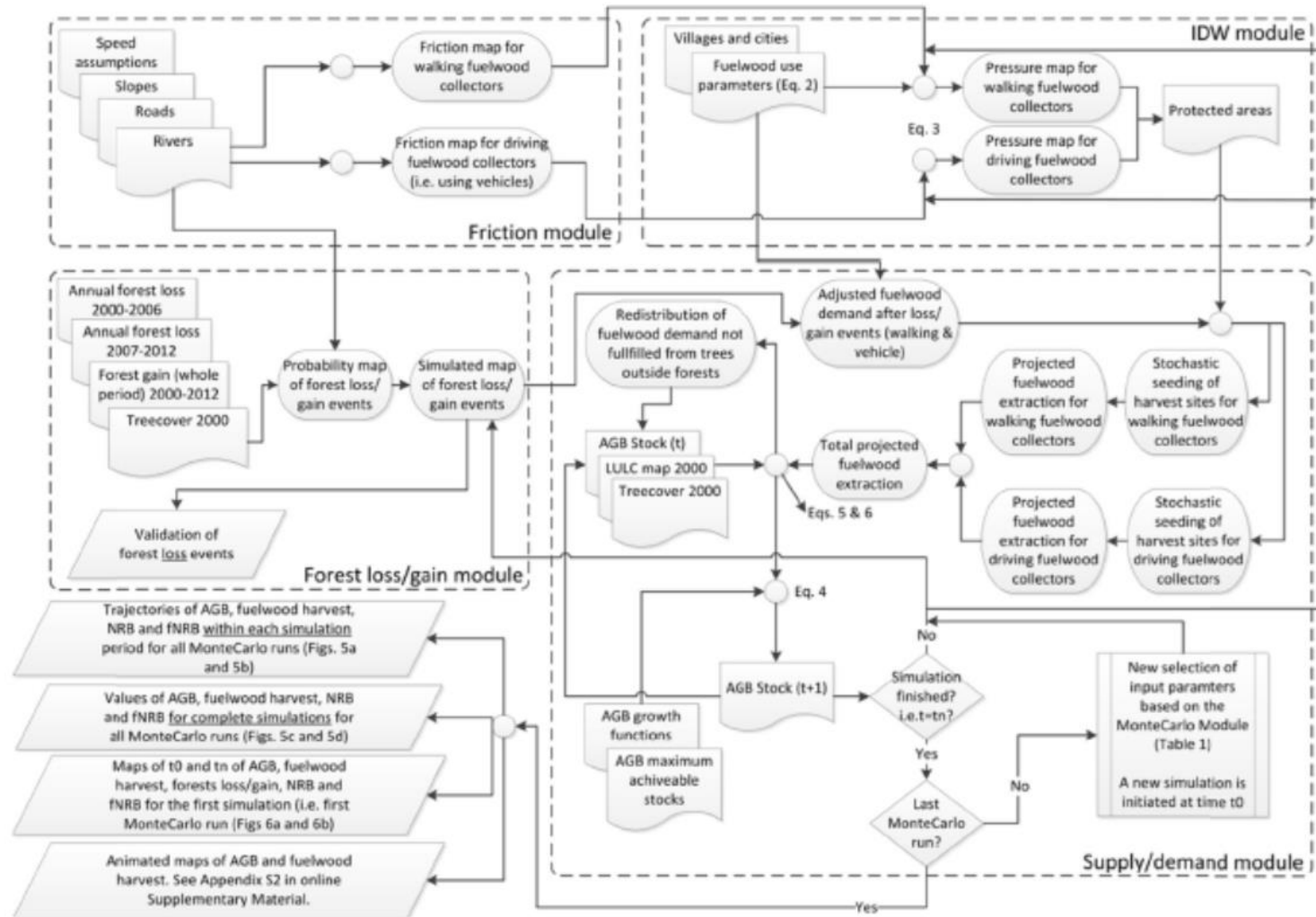


Fig. 2. Simplified flowchart of Mofuss showing main inputs and processes within each of the modules, and final outputs.

Figura 1.11 Diagrama simplificado de flujo de MOFUSS, [50]

MOFUSS ha sido utilizado con éxito para el modelaje de leña en Honduras, y se encuentra en proceso de ser utilizado para otras áreas geográficas. Las bases de datos para México ya se encuentran disponibles y como parte de este trabajo se iniciaron trabajos de modelaje para el estado de Yucatán.

1.2.6 Calidad de combustible y composición de la biomasa leñosa

La madera difiere en densidad, contenido de humedad y composición química en el interior de un árbol en sus ejes horizontal y vertical. La variación entre diferentes árboles individuales puede ser aún mayor, ya que estas propiedades dependen de la calidad del sitio dónde el árbol se encuentra, con diferentes disponibilidades de agua, temperatura, fertilidad del suelo, y otros factores. Además, estos parámetros son diferentes entre especies [51]. A continuación, se muestra una tabla de composición química de algunas especies,

Tabla 1.6 Composición química, base seca, de especies reportadas en la literatura [51]

Especie	Nombre Común	Holocelulosa (%)	Extraíbles (%)	Lignina Klason (%)	Ceniza (%)
<i>Acer rubrum L</i>	Maple rojo	77	21.7	21	0.4
<i>Liriodendrum tulipifera L.</i>	Álamo amarillo	62	20	20	1
<i>Quercus douglasii</i>	Roble azul	59	39	27	1.4
<i>Quercus rubra L.</i>	Roble rojo del norte	69	34.2	24	1.2
<i>Abies balsamea</i>	Olmo americano	73	21.5	22	0.4
<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba bruja	62	37	25	2.9

Debido a esta variabilidad es importante llevar a cabo un muestreo que sea significativo en términos estadísticos. Idealmente el muestreo debe de llevarse a cabo en diferentes partes del árbol, y de diferentes árboles con suficientes muestras para obtener un promedio representativo de los valores. En términos prácticos, la madera se recolecta en gran escala, mezclando el resultado del procesamiento del material en chipeadoras (tritadora) de muchos árboles, tomando al azar muestras de los chips resultantes.

En relación a su composición química, la madera contiene cantidades significativas de carbohidratos y consiste aproximadamente de 50% Carbono, 6% Hidrógeno, y 44% de Oxígeno y otros elementos. Estos elementos están organizados en complejos poliméricos

tales como la celulosa, hemicelulosa y lignina. Aproximadamente el 40-45% de la sustancia seca de la madera consiste en celulosa en la mayoría de las especies. La celulosa es un homopolisacárido compuesto exclusivamente de unidades de β -D-anhydro-glucopyranosa, ligados por enlaces β (1 $\rightarrow$ 4)-glicosídicos. La hemicelulosa se compone de cadenas cortas de hetero-polisacáridos compuestos de hexosas y pentosas. La lignina contiene metoxilos con una estructura de red sin una estructura primaria definida, contiene hasta el 67% de Carbono, es un importante componente de la madera y es responsable del contenido calorífico de la misma. Maderas suaves en general tienen un contenido energético más elevado que las maderas duras, debido a su mayor contenido proporcional de ligninas [52].

Una vez identificada la cantidad y características del material leñoso, la elección de la tecnología de aprovechamiento con fines energéticos se debe basar en tres aspectos principales:

- el tipo y la cantidad de biomasa de la que se dispone,
- la aplicación final que se pretende, es decir, qué necesidades energéticas se pretenden cubrir,
- y un grupo de factores varios (medioambientales y económicos).

Cuanto mejor esté cuantificada la biomasa disponible, y más detallado sea el conocimiento sobre sus características físicas y químicas, más sencilla y rápida será la etapa de elección de la tecnología, y la subsiguiente petición de ofertas. En función de la tecnología de generación eléctrica o térmica, será preciso que el syngas cumpla unos requisitos en cuanto a partículas, alquitranes, poder calorífico, concentración de cada gas, temperatura, etc. [53] En el caso específico de la gasificación (y otras conversiones termoquímicas), un contenido bajo de cenizas es preferible, ya que las cenizas pueden causar corrosión o encostramiento en el gasificador. Especialmente indeseables en la ceniza son los elementos Silicio (Si), Cloro (Cl), Potasio (K) y Azufre (S), ya que forman silicatos, sulfatos y cloruros alcalinos [54].

1.3 Conversión energética de la biomasa

La biomasa puede ser aprovechada de diferentes maneras. Existe la conversión termoquímica, la conversión bioquímica y la extracción de oleaginosas. La conversión termoquímica puede realizarse por combustión, gasificación y pirólisis; en tanto la

conversión bioquímica puede ser llevada a cabo por medio de digestión y fermentación. Estos métodos y sus aplicaciones se aprecian en la siguiente figura,

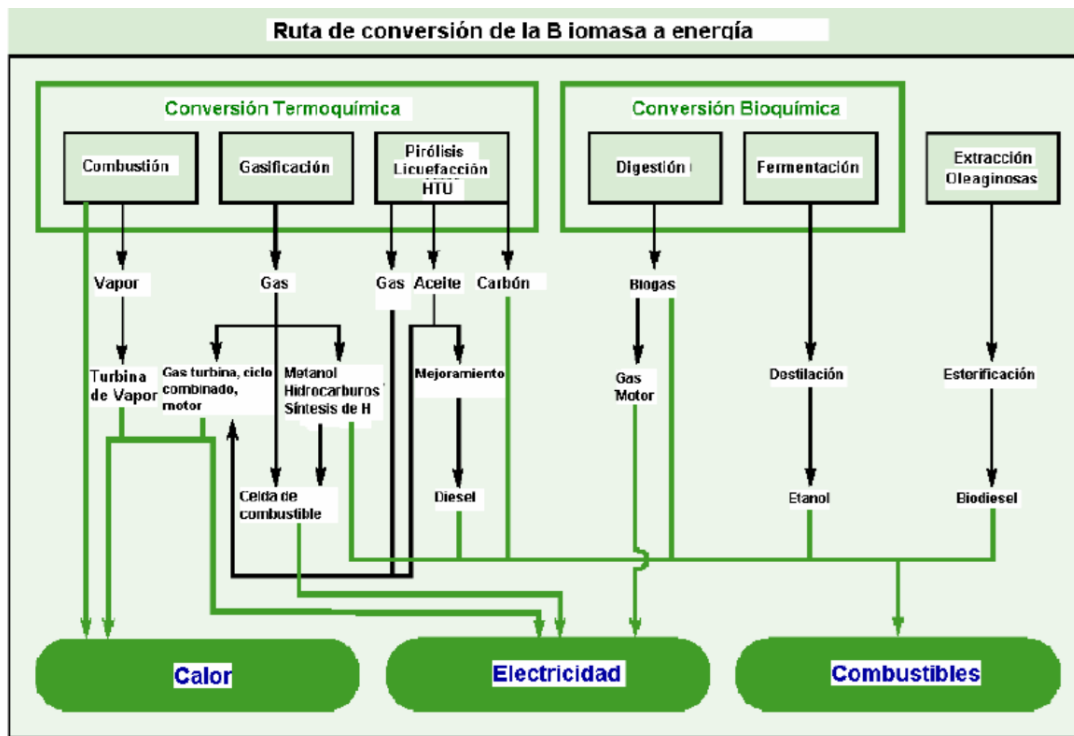


Figura 1.12 Rutas de Conversión de Biomasa a Energía, [55]

El término bioenergía se refiere a todos los tipos de energía derivados de biomasa, utilizando las diferentes tecnologías de transformación. Si nos enfocamos en el uso de biomasa de material lignocelulósico o leñoso, se describen a continuación los diferentes tipos de energía que se pueden obtener:

1. **Energía térmica.** Es una de las más comunes para el uso de la biomasa leñosa, proveyendo calor para cocinar y proveer calefacción a nivel doméstico o industrial. Además, el vapor producido en calderas, por combustión de la biomasa, puede ser usado en procesos industriales. Las necesidades de calor varían y pueden ser diferentes entre aplicaciones rurales o urbanas, domésticas o industriales.
2. **Energía eléctrica.** Puede ser obtenida por medio de diferentes tecnologías de transformación, dependiendo del tipo y cantidad de biomasa disponible. Por ejemplo, el vapor generado a través del proceso de combustión puede ser utilizado

para la producción de electricidad. Además, otras tecnologías de conversión tales como la gasificación, pirólisis y digestión anaeróbica producen gases (gas de síntesis o biogás) apropiados para la producción de electricidad a través de su uso como combustible en motores de combustión interna que mueven un generador de corriente.

3. Energía Mecánica. La conversión de la biomasa en un combustible líquido o gaseoso, que puede ser utilizado en automotores para el movimiento de vehículos. Estos llamados “biocombustibles de segunda generación” originados de biomasa lignocelulósica, pueden ser obtenidos a través de transformaciones termoquímicas o bioquímicas [56].

El aprovechamiento del material leñoso para producir bioenergía, puede reducir el peligro de incendios forestales, promover la producción de hábitats para múltiples especies y ligarse a programas de manejo de carbono. Es importante notar también que, en el contexto de la generación de energía eléctrica, a diferencia de otras fuentes de energía renovable, la biomasa tiene la capacidad de proveer energía “despachable” (*dispatchable*) en cualquier momento, ya que la biomasa vegetal sirve como un almacén de la energía solar usada durante su crecimiento; a diferencia de otras energías renovables intermitentes, tales como la solar o eólica [57].

La fuente más importante de biomasa susceptible de ser utilizada para la obtención de energía es el material lignocelulósico, en forma de madera o residuos de madera. Se ha reportado que el total global de energía que puede obtenerse de biomasa, estimado en el año 2006, es de $6-10 \times 10^{15}$ Btu. Del total de bioenergía producido, el 64% proviene de madera y residuos de madera, el 24% de residuos sólidos municipales, el 5% de residuos agroindustriales y 5% de gases de rellenos sanitarios [58]. Esto se debe a varios factores: la gran cantidad de residuos que se generan de la madera y que dependen de la cantidad que se colecta para la producción de tablas, pulpa y papel; la leña puede crecer en plantaciones como los cultivos; los desechos de la industria forestal como corteza, aserrín, bordes de tablas, etc. son ampliamente usados para la producción de energía. Aunque en los últimos años se ha incrementado el aprovechamiento de los residuos agrícolas para la generación de energía, ya que pueden encontrarse en grandes cantidades en ciertas locaciones, pero no siempre tienen la calidad necesaria para la producción de energía o su logística de manejo incrementa los costos de producción de energía [59].

1.4 Gasificación de biomasa

La gasificación se puede describir como una combustión incompleta. Se logra quemando material sólido tal como madera o carbón sin el aire suficiente para completar la combustión, de tal modo que el gas resultante aún contenga potencial de combustión. El gas sin quemar es entonces entubado para ser utilizado en una etapa posterior, tal como un motor de combustión interna. Este gas también puede ser utilizado en una caldera o una turbina. Además, la gasificación puede aplicarse para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (proceso Fischer-Tropsch). El gas resultado de la gasificación con aire, también llamado *producer gas* (llamado *syngas*, después de un proceso de mejora que elimina gases no combustibles, resultando en una composición básica de H_2 y CO [60]), tiene un poder calorífico inferior al gas natural (típicamente solamente un sexto). Además de sustituir a combustibles ligeros de origen fósil, la gasificación permite obtener electricidad a partir de biomasa de manera eficiente, lo cuál puede ser muy difícil mediante combustión directa para generación de vapor y posterior expansión de éste en un turbo alternador. Mediante gasificación se pueden alcanzar rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto-generadores accionados por syngas, mientras que con un ciclo Rankine convencional simple las cifras rondan un 22% de rendimiento eléctrico [61]. A continuación, un diagrama donde se ilustra esquemáticamente un sistema de gasificación de material leñoso para la generación de electricidad.

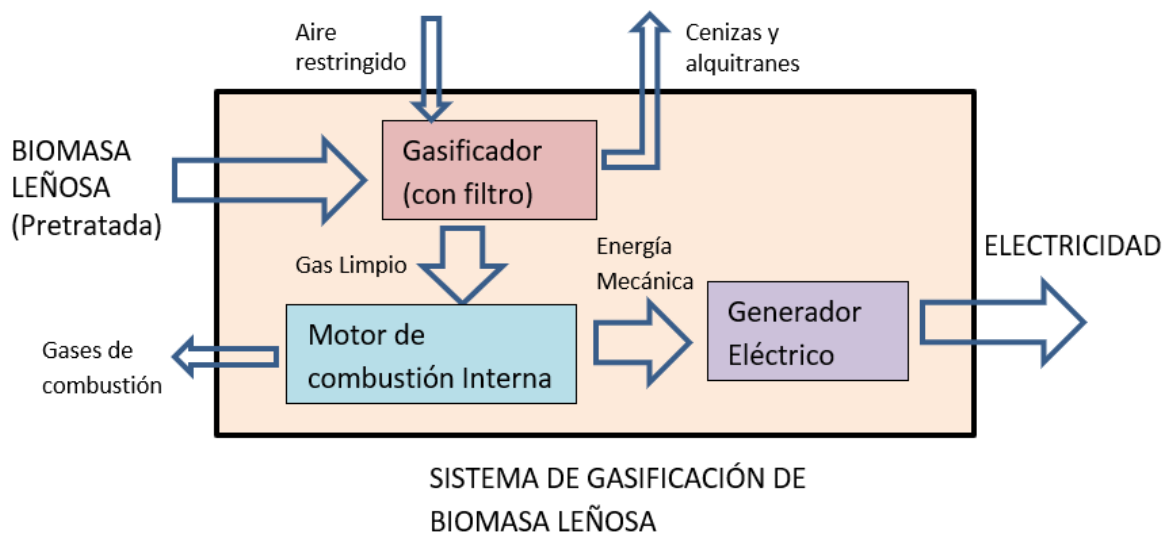


Figura 1.13 Sistema de gasificación de biomasa leñosa para la obtención de electricidad, basado en S. Schuck [57]

El rendimiento de un sistema de gasificación puede ser elevado sustancialmente en una configuración de cogeneración, donde la cogeneración se define como la producción combinada de calor y potencia [62]. Si se añade a un sistema de cogeneración como el descrito la operación de un sistema de enfriamiento, con una “trigeneración”, es posible alcanzar eficiencias del 80% [63].

El rendimiento de los gasificadores de biomasa puede ser caracterizado por varios parámetros. Entre ellos se encuentra la composición de la materia prima y del gas (que influye en el valor calórico del gas resultante), y la eficiencia de la gasificación. La eficiencia de la gasificación se puede expresar, partiendo de 1 mol de biomasa, como

$$\eta = \frac{\eta_{gas} * LHV_{gas}}{LHV_{Biomasa}} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde η_{gas} es la cantidad molar de gas producido, LHV_{gas} es el poder calorífico neto del gas producido (Low Heating Value) y $LHV_{Biomasa}$ es el poder calorífico neto de la biomasa. La eficiencia del proceso de gasificación puede ser también modelado por métodos matemáticos. Entre esto métodos se encuentra los que se basan en tasas cinéticas, modelos de equilibrio termodinámico y modelos de gasificación usando Aspen Plus [64].

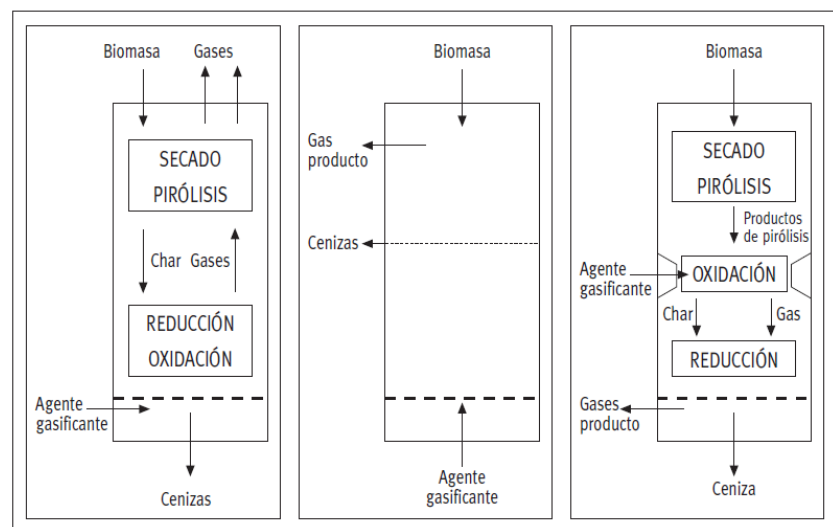
1.4.1 Tipos de gasificadores

La tecnología de gasificación se divide en dos tipos principales, dependiendo del tipo de diseño del reactor (Figura 1.14):

- De lecho fijo que, a su vez, se subdivide dependiendo del sentido relativo de las corrientes de combustible (biomasa) y agente gasificante (aire, oxígeno, hidrógeno o vapor de agua). Cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina “downdraft” o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denomina “updraft” o de contracorriente. Los gasificadores de tecnología downdraft producen gases con menores contenidos de tars (alquitranes, compuestos de carbono de cadena larga, que causan diversos problemas en el sistema). Estos equipos, sin embargo, requieren un rango de tamaño de partícula en el combustible más estricto (20-100 mm) y es menos tolerante a la humedad (menor al 20%).

Estos equipos se diseñan con una capacidad de 20 kW a 5 MW. Los gasificadores con tecnología updraft son relativamente flexibles en el tamaño de las partículas de combustible (5-100 mm) y el contenido de humedad (hasta de 55% en peso). Son diseñados con una capacidad termal nominal de 100 kW a 20 MW [65].

- De lecho fluidizado, en la que el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las partículas de éste se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas. Estos sistemas proveen un excelente mezclado y contacto gas-sólido, lo que mejora la velocidad de reacción y la eficiencia de conversión. Además, el uso del material de la cama para la transferencia de calor y catalizador reduce el contenido de tars del gas producido y mejora su calidad [66].



De izquierda a derecha, esquemas de funcionamiento de gasificadores updraft, de lecho fluidizado y downdraft.

Figura 1.14 Tipos de Gasificadores, [53]

También existen variantes de gasificadores por el tipo de agente gasificante (con inyección de aire, oxígeno o vapor); por fuente de calor (autotérmicos, donde el calor es provisto por la combustión parcial de la biomasa, o alotérmicos, que son provistos de una fuente externa de calor); o por diseño de presión (atmosférico o presurizado) [67].

1.4.2 Etapas y reacciones de la gasificación

Sin importar el tipo de gasificador, en la tecnología de gasificación la biomasa usando un gasificador de lecho fijo (ver figura 1.17) pasa por las etapas que se describen a continuación:

Secado. En esta etapa, a una temperatura de 100 °C ocurre el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma; en este proceso se absorbe calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para la evaporación del agua.

Pirólisis. En esta etapa que ocurre en el rango de temperaturas de 300-500 °C y en ausencia de oxígeno, se lleva a cabo la ruptura por calor de las moléculas grandes como la celulosa, lignina y hemicelulosa, dando lugar compuestos volátiles de cadena más corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa. Se genera también un residuo carbonoso y gases no condensables tales como metano, monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono.

Combustión u oxidación. En esta etapa, la ocurre la oxidación (combustión) de la fracción sólida obtenida del proceso de pirólisis (fracción carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua). Debido a que el oxígeno está en menor cantidad que el necesario para combustión completa, se produce una combustión incompleta y se genera también CO. En esta etapa se genera el calor necesario para las etapas endotérmica, ya que tanto la combustión completa como la incompleta, son reacciones exotérmicas. En esta etapa también ocurre la combustión del CH₄ y el H₂ producido en la etapa de pirolisis, así como el craqueo de los volátiles condensables.

Reducción. En esta etapa, que por lo general se lleva a cabo cuando el sólido presente alcanza temperaturas mayores de 700 °C y ocurren las reacciones del sólido carbonoso con vapor de agua, dióxido de carbono e hidrógeno, para producir la mezcla de gases que salgan el gasificador.

Siguiendo las etapas en el sentido del agente gasificante, las etapas en un gasificador downdraft siguen este orden (ver figura 1.17): (i) Oxidación parcial del residuo carbonoso la pirolisis de biomasa, con generación calor e incremento de la temperatura ya que las reacciones de oxidación son exotérmicas; (ii) En la zona de reducción, la falta de oxígeno unida a la disponibilidad de carbono, CO₂ y vapor de agua, hace que se produzca una

recombinación hacia hidrógeno molecular y monóxido de carbono; (iii) La tercera etapa en el sentido del gas, es la pirólisis en la que, por efecto del calor, las moléculas de los componentes de la biomasa se rompen y los más volátiles se convierten en gas, uniéndose a la corriente de los gases de la etapa previa; (iv) Por último, los gases calientes evaporan el agua contenida en la biomasa que se alimenta al gasificador en la zona de secado [53].

1.4.3 Calidad del gas producido

La gasificación de un combustible implica convertir la energía química contenida en el combustible sólido en energía química contenida en el producto gaseoso. Como establece la primera ley de la Termodinámica, la energía no puede perderse, excepto por las pérdidas del proceso al ambiente. Considerando la Segunda ley de la Termodinámica, estos procesos de conversión son acompañados por un aumento irreversible de la entropía, lo cual lleva a una reducción en la Exergía (energía disponible). Por tanto, aunque la energía se conserva, la calidad de esta decrece ya que es convertida a una forma diferente, de la que se puede obtener una cantidad menor de trabajo. Para un combustible conteniendo carbono, hidrógeno y oxígeno a una presión fija, la temperatura del sistema CHO es determinado por la razón de equivalencia (RE) que es la cantidad de aire adicionado relativo a la cantidad de aire requerido para la combustión estequiométrica. Dependiendo del RE, una conversión termoquímica puede ser clasificada como pirólisis ($RE=0$), gasificación ($RE=0.25-0.50$) o combustión ($RE\geq 1$). A este respecto, los procesos de conversión de energía estudiados pueden mostrarse en un diagrama triangular C-H-O, como se muestra en la figura abajo. La composición en cualquier punto del diagrama puede ser calculado para una temperatura y presión dadas modelando la composición de la fase gaseosa en equilibrio con el carbono sólido (grafito). Los métodos para calcular los complejos equilibrios se basan en la minimización de energía libre de Gibbs del sistema o en la solución de la reacción aplicable de equilibrio en conjunto con el balance de materiales. En el diagrama triangular se muestran varias líneas mostrando las fronteras de deposición de carbono. Por encima de la frontera de carbono sólido, el carbono sólido existe en equilibrio heterogéneo con componentes gaseosos, en tanto que debajo de la línea no existe carbono sólido. La mayoría de los combustibles de hidrocarburos se ubican por encima de la frontera de carbono, lo cual implica que si estos combustibles son llevados a un equilibrio químico, se forma carbono sólido. Esto implica que para evitar la formación de carbono sólido y lograr

gasificación completa se debe añadir oxígeno y/o hidrógeno, cuyas fuentes son H_2 , H_2O , O_2 , aire ó CO_2 .

Si representamos a la biomasa con la fórmula general $CH_{1.4}O_{0.59}N_{0.0017}$ que es indicada en el punto A del diagrama triangular, cuando se añade oxígeno la composición se mueve hacia el punto B. En este punto todo el carbono está presente en la fase gaseosa como monóxido de carbono, dióxido de carbono o metano. Si se añade más oxígeno, la línea entre el CO_2 y el H_2O es cruzada, por lo que el combustible ha sido quemado en su totalidad (y se presenta el oxígeno libre). Una razón de equivalencia de 1, correspondiente a la oxidación completa, requiere 1.475 g de oxígeno, o 6.331 g de aire por gramo de biomasa. La siguiente ecuación describe esto, ignorando la pequeña cantidad de nitrógeno contenido en la biomasa [68]:

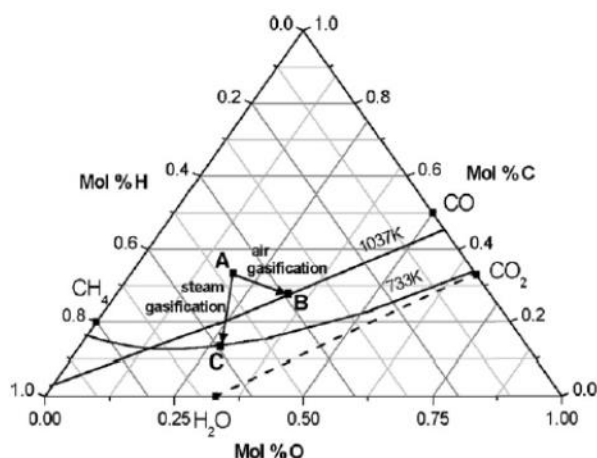
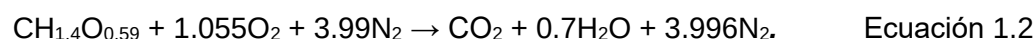


Figura 1.15 Cambios químicos durante la conversión de biomasa, [68]

La composición del *producer gas* depende principalmente de la temperatura del reactor, que es a su vez influenciado por la Razón de Equivalencia. Concentraciones adicionales de CO , H_2 y CH_4 son también afectados por la cinética de las reacciones químicas en el proceso de gasificación, por lo que el tipo de agente de oxidación usado influye en la composición del gas y su poder calorífico. Las concentraciones de CO y H_2 alcanzan un máximo conforme la RE aumenta y entonces empieza a declinar la concentración de estos compuestos útiles debido a la intensificación de la combustión promovida por valores más

altos de RE, aumentando los valores de CO_2 y N_2 . El aire como agente oxidante produce gas con una concentración relativamente alta de nitrógeno resultando en un bajo poder calorífico que usualmente no excede los 6 MJ/Nm^3 , clasificado como gas pobre, con una concentración típica de 15-20% de H_2 , 15-20% de CO , 0.5-2% de CH_4 , 10-15% de CO_2 con el remanente de N_2 , O_2 y CxHy -. Por otra parte, si se utiliza oxígeno o vapor de agua como oxidante (o una mezcla de ambos), se eleva la concentración de los componentes útiles del gas significativamente elevando el poder calorífico a 18 MJ/Nm^3 [69].

1.4.4 Gasificadores para producción de energía eléctrica a pequeña escala

Para cumplir el objetivo de producir electricidad de la mejor manera desde el punto de vista técnico y económico, se debe tener el cuidado de elegir un gasificador con un diseño que minimice la producción de alquitranes como es el caso del Gasificador Downdraft Imbert (Figura 1.16). Estos alquitranes o compuestos volátiles condensables dañan al motor de combustión interna, que debe utilizar el gas producido en el gasificador, usado para producir energía mecánica que motorice al generador de energía eléctrica. De los diseños de gasificadores básicos, los diseños tipo downdraft son los que menos alquitranes producen, considerando a los de tipo updraft como los que más alquitranes producen, y los de cama fluidizada con producción intermedia [70].

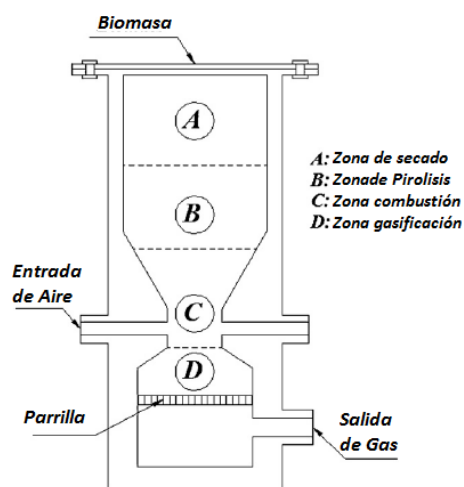


Figura 1.16 Gasificador Downdraft Imbert, [69]

El gasificador downdraft es también apropiado para producir energía eléctrica para microgrids rurales, siendo el rango disponible desde 1 kW a 5 MW [71]. Existen en venta

sistemas de generación eléctrica por gasificación de diseño downdraft, que reducen sus costos aprovechando motores de combustión interna y generadores producidos en serie, tal como el Power Pallet PP20, de 20 KW de potencia eléctrica, de la empresa APL (All Power Labs). Estos sistemas proveen electricidad a partir de la gasificación de material leñoso, utilizando un motor industrial de combustión interna, generador eléctrico y Unidad de Control de Proceso (Process Control Unit, PCU). El PCU monitorea y responde a las condiciones del reactor, motor y filtro, con la señal de un sensor de oxígeno para control de la mezcla de gas y aire. El sistema PP20 cuenta con puertos de control, que pueden ser usados para el muestreo o monitoreo del gas producido [72].

HIPÓTESIS

El material leñoso disponible, de manera sustentable, en comunidades rurales en el estado de Yucatán, es suficiente para la operación de sistemas de gasificación, para producción de energía eléctrica, con viabilidad técnica y económica a largo plazo.

OBJETIVOS (GENERAL Y ESPECÍFICOS)

Determinar la factibilidad del proceso de la gasificación de leña, como fuente de generación de energía eléctrica, en comunidades rurales del Estado de Yucatán.

Los objetivos específicos:

- Determinar la calidad y cantidad del material leñoso disponible
- Determinar el rendimiento de la tecnología con el material leñoso disponible
- Determinar la escala y tecnología de gasificación más apropiada para las comunidades rurales
- Realizar un estudio de viabilidad económica preliminar de la instalación de un gasificador de material leñoso en las comunidades rurales

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Cantidad de biomasa leñosa disponible

Para determinar la cantidad de biomasa leñosa disponible en la Península de Yucatán se usó información del **Inventario Estatal Forestal y de Suelos del Estado de Yucatán** que reporta los volúmenes de madera disponibles en el estado. A esta información se añadió el **Estudio Regional Forestal de la UMAFOR 3102** que considera sustentable el retiro anual del 15% del volumen total de madera en una amplia región del estado de Yucatán. También se llevó a cabo una modelación preliminar utilizando el programa MOFUSS, en colaboración con el Dr. Adrián Ghilardi en el LANASE (Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica) de la UNAM, unidad Morelia.

Los parámetros iniciales para la modelación se listan abajo:

PARÁMETROS	
Año de inicio	2008
Periodo de simulación	32 años
Corridas de MonteCarlo	20
Periodo de cada iteración	48 semanas (12 meses)
Inventario inicial	Mapa Woods Hole Research Center
Tasa de crecimiento del uso de material leñoso	1.4% anual

Para estas modelaciones, se utilizó en el escenario ICS de ahorro de leña por medio de estufas de ahorradoras de leña, con una tasa de introducción del 2% anual.

2.2 Determinación de la composición química y caracterización física de la biomasa leñosa

Las características del material leñoso a utilizar son de suma importancia, ya que tiene un impacto en el sistema de gasificación a utilizar, y puede informar la decisión de implementar métodos de condicionamiento del material, previo a su alimentación al gasificador. Para este fin se identificaron las especies productoras de material leñoso que se encuentran disponibles en el Estado de Yucatán con base a la preferencia de recolección y abundancia en el sitio de muestreo. En la Tabla 2.1 se muestran las especies reportadas como de mayor *frecuencia relativa de uso* para la recolección de leña en la región, y en la **Tabla 2.2** las tres

especies con el mayor *valor de importancia* en la vegetación del Parque Científico Tecnológico de Yucatán (PCTY). Estas especies son las que se utilizarán como referencia en este trabajo.

Se colectaron ramas en el PCTY de las especies escogidas como muestras para análisis. Las ramas de las especies se secaron a temperatura ambiente, se cortaron en rodajas de un cm de espesor en una sierra de cinta, y se molieron en un molino de cuchillas Pagani provisto de una malla número 2. La madera molida se tamizó y se recuperó el producto retenido entre las mallas 40 y 60 (tamaño de partícula entre 0.25 y 0.4 mm, 250-400 micrones).

Tabla 2.1 Especies con mayor frecuencia relativa de uso de acuerdo con el trabajo de Quiroz-Carranza y Orellana (2010), [45]

Número	Frecuencia relativa de uso	Nombre Científico	Nombre común	Familia
1	26.82	<i>Senegalia gaumeri</i>	Boxkatsim	Fabaceae
2	18.27	<i>Havardia albicans</i>	Chukum	Fabaceae
3	16.88	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Tsalam	Fabaceae

Tabla 2.2 Especies con mayor frecuencia en el PCTY de uso de acuerdo con el trabajo, S. Escalante Rebolledo, (2015, sin publicar).

Número	Valor de importancia	Individuos/ha	Nombre Científico	Nombre común	Familia
4	0.4594	1460	<i>Croton glabellus</i>	P'eresk'uch, X kookché	Euphorbiaceae
5	0.2703	1040	<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	ya'ax xu'ul	Fabaceae
6	0.2968	1130	<i>Neomillspaughia emarginata</i>	sakits'a	Polygonaceae

Adicionalmente, para la especie *Senegalia gaumeri*, se colectó un árbol completo en forma de leña y se procesó en una chipeadora para obtener astillas, las que se molieron para recuperar fracción retenida entre malla 40-60 (**Figura 2.1**), del mismo modo que las muestras de ramas jóvenes descritas arriba.

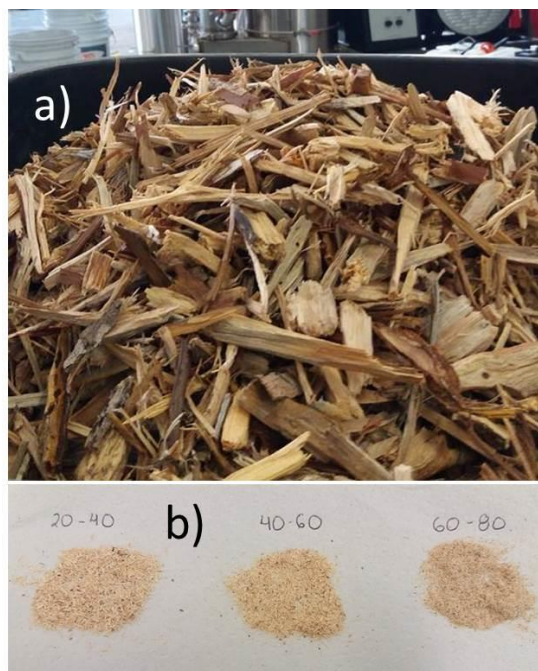


Figura 2.1. Astillas y fibras molidas de *Senegalia gaumeri*

Determinación del contenido de Humedad y Cenizas

El contenido de humedad se determinó siguiendo el método ASTM E 871-82, llevándose a cabo por triplicado. Se pesaron aproximadamente 2 gr de material en crisoles cerámicos puestos previamente a pesos constante. A continuación, se colocaron los crisoles en una estufa de convección a 100 °C hasta lograr peso constante. Se calculó el porcentaje de humedad mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{A-B}{A} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:

A = peso de la muestra húmeda, g

B = peso de la muestra seca, g

El contenido de cenizas se determinó siguiendo el método ASTM D 1102-84. Las muestras secas se colocaron en una mufla, y se calentaron a 600 °C hasta lograr un peso constante. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Ceniza} = \left(\frac{C}{B} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

B = peso de la muestra seca, g

C = peso de la ceniza, g

Adicionalmente, se determinó la composición elemental de las cenizas usando un detector de dispersión de rayos X (EDX) de Oxford Instruments acoplado a un microscopio electrónico de barrido JEOL.

Determinación de extraíbles

Se determinó el contenido de extraíbles mediante el método T-204 cm-97 de TAPPI. El material tamizado se colocó en cartuchos de papel filtro y se pusieron a peso constante. y se llevó a cabo la extracción en un equipo soxhlet con una mezcla benceno/etanol (2:1) por un mínimo de cinco horas o 16 ciclos de extracción. Los cartuchos se drenaron, se secaron primero a temperatura ambiente en una campana de extracción y posteriormente en estufa a 100 °C hasta peso constante. El líquido se concentró utilizando un evaporador rotatorio hasta la remoción de la mezcla de solventes, que se preservó para su posterior caracterización. El método se repitió usando etanol puro como disolvente.

La extracción con agua se llevó a cabo con el método T-207 cm-99 de la TAPPI. En este caso, se pesó el material leñoso resultante de la extracción de los solventes, se colocó en matraces con 900 mL de agua destilada, y se calentó a ebullición durante una hora. La suspensión resultante se filtró usando embudos de filtrado buchner. El proceso de ebullición se repitió en dos ocasiones y el sólido resultante se secó en una estufa de convección hasta peso constante. El agua de la primera extracción se concentró y liofilizó para su posterior caracterización.

La pérdida de peso en cada extracción representa el porcentaje de extraíbles en cada etapa, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Extraíble} = \left(\frac{D-E}{D} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

D = peso de la muestra sin extraer, g

E = peso de la muestra libre del extraíble, g

Determinación de Lignina Klason y holocelulosa

Se determinó el contenido de lignina utilizando el método Klason, según la técnica TAPPI 222 modificada usando la muestra libre de extraíbles. Se pesó aproximadamente 1 g de material libre de extraíbles y se sometió a una hidrólisis ácida con 15 mL de H₂SO₄ al 72% (p/p). Por medio de un baño maría la muestra se mantuvo a temperatura constante a 15 °C y en agitación por dos horas. A continuación, la suspensión se diluyó con agua hasta una concentración aproximada del 4% y se mantuvo en ebullición por 4 horas. La solución fue entonces filtrada en un filtro de vidrio poroso tipo “F” previamente llevado a peso constante, con el residuo insoluble secado en una estufa a 100 °C para su cuantificación gravimétrica de acuerdo con la ecuación:

$$\% \text{ Lignina} = \left[\left(\frac{E}{F} \right) * \left(1 - \frac{G+H}{100} \right) \right] * 100 \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

E = peso de lignina, g

F = peso de la muestra libre del extraíble, g

G = extraíbles con solventes orgánicos, % en peso

H = extraíbles con agua, % en peso

El contenido de holocelulosa se determinó restando el contenido de lignina y de extraíbles totales del total expresado en porcentaje.

$$\text{Holocelulosa} = 100 - \% \text{ Lignina Klason} - \% \text{ Extraíbles Totales} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Composición elemental de leña

Este análisis se conoce también como análisis CHONS, ya que se considera que, para fines prácticos, el 100% del material orgánico analizado se compone de los elementos Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre. Se utilizó un equipo de combustión rápida equipado con cromatografía de gases y detector elemental Flash 2000 HT de la marca ThermoScientific. El sensor elemental del equipo produce una gráfica de detección de los elementos presentes en la muestra con la integración automática de áreas bajo la curva se calcula el porcentaje del peso de cada elemento. Se utilizaron muestras de leña tamizadas

entre malla 40 y 60, pesando de dos a tres mg del material, para su cuidadosa introducción a cápsulas de estaño. Estas cápsulas se introducen en el carrito de toma de muestras automático del equipo, corriendo su ciclo de análisis.

Se determinó el poder calorífico mediante la ecuación de Francis and Lloyd, que ha demostrado ser un método muy preciso para predecir el poder calorífico de biomasa vegetal [73]. La fórmula, expresada como el valor mayor de calor de muestra seca (Higher Heating Value) se muestra a continuación:

$$\text{HHV (kJ/kg)} = 357.8C + 1135.6H + 54.9N + 119.5S - 85.4O - 974 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Determinación de la densidad y el FVI (Fuel Value Index)

La leña considerada de alta calidad es consistente con una densidad elevada, ya que permite una mayor capacidad de carga de energía por unidad de volumen, como se ha demostrado en estudios de África [74], la India [75], y América del Sur [76,77].

De ramas recolectadas de las especies de árboles en estudio, se cortaron secciones cuyas dimensiones fueron medidas meticulosamente y pesados para determinar su densidad. Estos resultados junto los resultados del poder calorífico y el contenido de cenizas son usados para determinar el FVI, usando la fórmula mostrada abajo, [78], donde un FVI alto refleja una leña más atractiva para la generación de energía.

$$FVI = \frac{\text{Poder calorífico} \times \text{Densidad}}{\text{Contenido de ceniza} \times \text{humedad}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

2.3 Determinación de las variables cinéticas de reacción en atmósfera inerte por medio de análisis termogravimétrico

La cinética de la volatilización es de gran utilidad para el diseño y escalamiento de sistemas energéticos de biomasa, y el modelado de otros fenómenos, tales como los incendios forestales.

Los parámetros a determinarse en la descripción de la cinética de volatilización son:

- La energía de activación aparente, E_a
- El factor pre-exponencial (o factor de frecuencia), A
- La constante de tasa cinética, K

La Energía de Activación es requerida para iniciar una reacción química, así sea una reacción que libere energía superior a esta energía inicial. Para que la reacción ocurra, algunos o todos los enlaces químicos en los reactantes deben ser rotos para que nuevos enlaces, de los productos de la reacción, puedan formarse. Para llevar a los enlaces a un estado que les permita romperse, la molécula debe sufrir contorsiones o deformaciones en un estado inestable llamado de transición. El estado de transición es un estado de alta energía, por lo que una cantidad de energía (la energía de activación) debe ser añadida a la reacción. Debido a que el estado de transición es inestable, las moléculas permanecen en ese estado brevemente, procediendo al siguiente paso de la reacción química. La energía de activación de una reacción química se encuentra fuertemente relacionada a su velocidad de reacción. De este modo, mientras más alta es la energía de activación, más lenta es la velocidad de reacción.

La expresión de Arrhenius, expresa la relación de E_a con A y K, y se presenta abajo:

$$K = Ae^{(-E_a/RT)} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Dónde T es la temperatura absoluta (K), y R es la constante de los gases (8.314 JK⁻¹ mol⁻¹). El factor de frecuencia provee una medida de la frecuencia a la que las moléculas colisionan, sin importar su nivel de energía. La constante K, siendo el producto de A y el término exponencial, produce la frecuencia de colisiones exitosas. En términos del método experimental existen dos alternativas: la termogravimetría dinámica, en la que las muestras son sometidas a temperaturas crecientes (usualmente a una tasa constante de calentamiento) o la termogravimetría isotérmica a temperatura constante en función del tiempo.

Por medio de varias rampas de calentamiento para cada especie (análisis no isotérmico, o dinámico), se investigó los parámetros de cinética de volatilización del material leñoso muestreado. Dado que se utilizó un flujo de nitrógeno, estos resultados se pueden considerar como una manera de estudiar el mecanismo de volatilización de la pirólisis de las muestras leñosas, recordando que la pirólisis es una etapa del proceso de combustión y de gasificación. Los métodos usados para calcular los parámetros cinéticos son llamados “libres de modelo no isotérmicos” (*model-free non-isothermal*) requiriendo datos de gravimetría a diferentes rampas de calentamiento (o tasas de calentamiento). Estos

métodos permiten obtener los parámetros cinéticos de una reacción de estado sólido sin saber el mecanismo de reacción.

El modelo global en un paso asume que la devolatilización procede en una reacción



Donde los volátiles representan la suma de gases y alquitranes y k es la tasa constante de reacción cuya dependencia a la temperatura es expresada en la ecuación de Arrhenius (**Ecuación 2.8**), donde E_a es la energía de activación (kJ mol^{-1}), T es la temperatura absoluta (K), R es la constante de los gases ($8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) y A es el factor pre exponencial (min^{-1}).

La tasa de transformación del estado sólido a producto volatilizado es descrita por la siguiente expresión

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde α , t , $k(T)$, $f(\alpha)$ representan, en el orden de mención, el grado de conversión del proceso, el tiempo, la constante de la tasa de velocidad y el modelo de la reacción. La conversión, α , es calculada de la pérdida de peso de la muestra, definida como

$$\alpha = \frac{m_i - m_a}{m_i - m_f} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde m_i es la masa inicial de la muestra, m_a es la masa en tiempo presente y m_f es la masa al término de la devolatilización.

La combinación de las Ecuaciones 2.8 y 2.10 resulta en la expresión fundamental de métodos analíticos para el cálculo de parámetros cinéticos basados en resultados de termogravimetría.

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot f(\alpha) \cdot e^{-E_a/RT} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

La expresión de la función $f(\alpha)$ es usada para describir reacciones en estado sólido de primer orden utilizando la siguiente expresión

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Para experimentos de TGA no isotérmicos (dinámicos) con una tasa lineal de calentamiento $\beta = dT/dt$, la Ecuación 2.13 puede escribirse expresando la fracción de material consumida en el tiempo como

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} \cdot (1 - \alpha)^n \cdot e^{-E_a/RT} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Método Kissinger

Kissinger desarrolló un método en el que no es necesaria la energía de activación (E_a) para cada valor de conversión. Este método permite obtener los valores de energía de activación de una gráfica de $\ln(\beta/T_m^2)$ contra $1000/T_m$ para una serie de experimentos a diferentes rampas de calentamiento (β), donde T_m es la temperatura del máximo del diferencial. La ecuación utilizada es

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) \ln\left(\frac{AR}{E}\right) - \frac{E}{RT_m} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde la energía de activación E_a puede ser calculada de la pendiente del gráfico, que es igual a $-E_a/R$.

Método Flynn-Wall-Ozawa (FWO)

Este método permite la obtención de energías de activación de un gráfico de logaritmos naturales de las tasas de calentamiento, $\ln\beta_i$, contra $1000/T_{\alpha i}$, representando la relación lineal con un grado dado de conversión a diferentes tasas de calentamiento.

$$\ln(\beta_i) = \ln\left(\frac{A_\alpha E_\alpha}{R_g(\alpha)}\right) - 5.331 - 1.502 \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha i}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Donde $g(\alpha)$ es constante para un valor dado de conversión. Los subíndices i y α denotan un valor dado de tasa de calentamiento y un valor dado de conversión, respectivamente. La energía de activación E_a es calculada de la pendiente $-1.052E_a/R$.

Método Kissinger-Akahira-Sunose (KAS)

Este método se basa en la siguiente expresión

$$\ln\left(\frac{\beta_i}{T_{ai}^2}\right) = \ln\left(\frac{A_\alpha R}{E_\alpha g \alpha}\right) - \frac{E_\alpha}{RT_{ai}} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde la activación de energía aparente puede ser obtenida de una gráfica de $\ln(\beta_i/T_{ai}^2)$ contra $1000/T_{ai}$ para un valor dado de conversión, α , donde la pendiente es igual a $-E_a/R$.

2.4 Pirolisis y gasificación en horno horizontal

La pirolisis-gasificación del material leñoso se llevó a cabo, por duplicado, con el sistema mostrado esquemáticamente en la Figura 2.2, que consta de las siguientes partes: un horno tubular eléctrico, alimentación de nitrógeno y/o aire, un reactor tubular de cuarzo acoplado a un sistema de condensación de volátiles y de muestreo de volátiles no condensables (gases). El procedimiento usado fue el siguiente:

Se pesaron muestras de 8 g del material leñoso (retenido en malla 60-40) y se introdujeron cuidadosamente en el tubo de cuarzo, de tal forma que, en cada prueba, quedase distribuido en el área de calentamiento del horno. Se usó una rampa de calentamiento de 20 °C/min desde temperatura ambiente y un flujo de Nitrógeno (0.4 LPM). Adicionalmente, en diferentes pruebas, se inició la adición de un flujo de aire (0.26 LPM), a diferentes temperaturas. Al llegar a la temperatura final de la rampa, el horno se mantiene a esta temperatura por otra media hora. Se apagó el horno y se dejó enfriar. Se colectaron las fracciones líquidas (condensables) y sólidas, las que se pesaron y por diferencia al 100% se determinó la cantidad de gas producido. Se operó el proceso para las seis muestras (una para cada especie de árbol).

Los no condensables, resultado de este proceso, se muestrearon a diferentes temperaturas (450, 550, 650, 750 y 850 °C) usando bolsas de muestreo de gases. Estas muestras fueron analizadas para determinar su composición utilizando un cromatógrafo Perkin Elmer Clarus 500, con detector TCD (Thermal Conductivity Detector), usando una columna Perkin Elmer Elite-GC GS Molesieve, y utilizando gas nitrógeno como gas de arrastre. Se obtuvieron resultados expresados en porcentaje de la señal para las moléculas de Hidrógeno (H₂), Dióxido de Carbono (CO₂) y metano (CH₄) ajustadas al 100%, requiriendo una estandarización para traducir estos datos en concentración en las muestras

En análisis posteriores de los volátiles no condensables (gases), se utilizó alternativamente un analizador de gases en línea, marca ETG, modelo MCA 100 Syn P, con capacidad de

monitoreo continuo de H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , O_2 y N_2 . El equipo utiliza un sensor infrarrojo (NDIR, *nondispersive infrared sensor*) para la detección de CH_4 , CO , y CO_2 , un sensor electroquímico para la detección de O_2 , y un sensor térmico conductivo para la detección de H_2 . El equipo también provee un estimado de la capacidad calorífica del gas monitoreado.

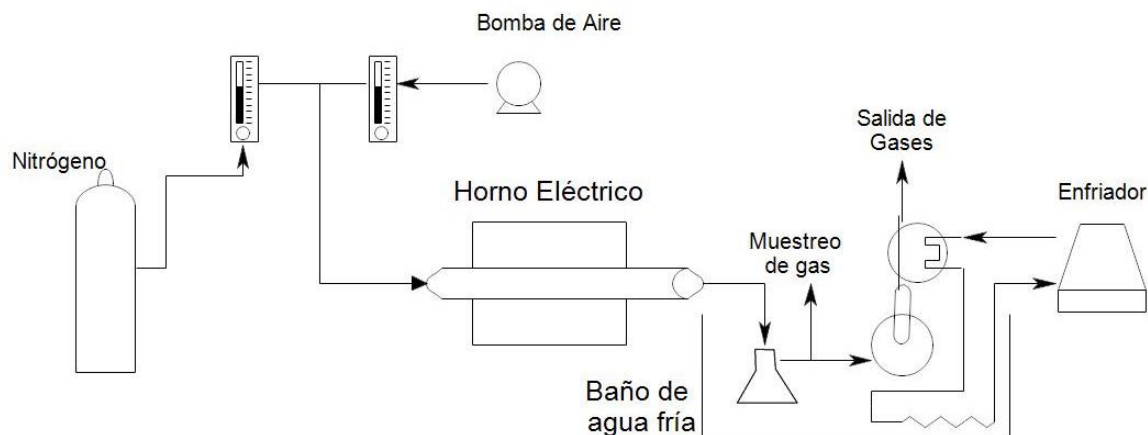


Figura 2.2 Diagrama de sistema para la pirolización y gasificación en horno horizontal, elaboración propia

2.5 Viabilidad económica de sistema de gasificación de biomasa en sistema aislado para generación de electricidad

En países en desarrollo la falta de energía eléctrica se correlaciona con la pobreza y causa de extremas dificultades para alcanzar el desarrollo. Este problema, especialmente grave en regiones rurales de África subsahariana y el sur de Asia también existe en México. El primer paso de solución del problema de la falta de energía eléctrica normalmente se enfrenta con sistemas aislados (llamados isla), que proveen electricidad a hogares que se encuentran aislados geográficamente, o que por el número de usuarios no justifica el elevado costo de construir líneas de transmisión de electricidad, proveyendo energía de la red eléctrica nacional. Estos sistemas isla consisten en un sistema auto-contenido, que tiene uno o más fuentes de energía (generador), sistema de acondicionamiento de la electricidad, y el cableado para transmitir la electricidad a la instalación, hogar o grupo que

conforma la comunidad, para su uso final. Normalmente la fuente de electricidad en estos sistemas es una planta de combustión interna (usualmente alimentada de combustible diésel), paneles solares, sistema eólico, o una combinación de éstos. En este estudio nos interesa explorar la viabilidad económica de un sistema aislado que utilice un gasificador de biomasa leñosa como fuente de energía, tema a desarrollar en las siguientes secciones.

Para medir la viabilidad económica para utilizar un sistema de gasificación de biomasa leñosa para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de Yucatán, sin acceso a la red eléctrica nacional (sistema aislado o sistema isla) que consta de las siguientes partes:

1. Biomasa leñosa proveniente de la vegetación aledaña a la zona.
2. Tratamiento de la biomasa leñosa.
3. Un equipo de Producción de Electricidad basado en Gasificación de Biomasa (PEGB)
4. Sistema de distribución de electricidad en pequeña escala (microgrid).

Se han documentado esfuerzos de cuantificar el beneficio económico de sistemas de gasificación, sobre todo en la India [79]. Desde el punto de vista del desarrollador del proyecto, el PEGB será viable en términos financieros si el valor presente del costo (C_{pv}) del proyecto es menor o al menos igual al valor presente de los beneficios a lo largo de los años de operación (o vida útil) del proyecto por la venta de electricidad (B_{pv}). Esto se puede expresar matemáticamente como

$$C_{pv} \leq B_{pv} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

El valor presente de los componentes de C_{pv} en la ecuación arriba, para un PEGB se puede definir como la suma de los valores presentes de los gastos de capital, de operación y mantenimiento durante la vida útil del proyecto. Esto se puede expresar como

$$C_{pv} = C_0 \sum_t \frac{C_{a,t}}{(1+d)^t} + \sum_t \frac{C_{f,t}}{(1+d)^t} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Dónde:

- Gasto de capital (C_0) incluye el costo de capital de equipos en la forma de un gasificador de biomasa, estructura para el sistema de gasificación (caseta), sistema de distribución de electricidad.

- Gastos anuales de operación y mantenimiento ($C_{a,t}$) incluye el salario de los operadores, costos de mantenimiento, costos de contingencia, etc.
- Gastos anuales de combustible ($C_{f,t}$) que se calcula multiplicando el precio del material leñoso por la cantidad consumida
- La tasa de descuento (d)
- Vida útil del proyecto en años (t)

El valor presente del componente de los ingresos (del beneficio) en la Ecuación 2.18 es el valor presente del ingreso generado de la venta de electricidad en los años del proyecto, representado como:

$$\text{Beneficios} = \sum_t \frac{P_{e,t} * E_t}{(1+d)^t} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Donde $P_{e,t}$ es el precio de la electricidad, y E_t es la electricidad neta generada por el proyecto.

Igualando las ecuaciones 2.19 y 2.20, y resolviendo para el precio que haría esta condición cierta, tenemos:

$$P_e = \frac{C_0 + \sum_t (C_{a,t} / (1+d)^t) + \sum_t (C_{f,t} / (1+d)^t)}{\sum_t (E_t / (1+d)^t)} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Dónde P_e es el precio de equilibrio de la electricidad, donde los costos igualan a los ingresos del proyecto. Con este precio de la electricidad, (el precio por kWh), tenemos el parámetro fundamental para comparar el rendimiento del sistema con sistemas tradicionales.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Potencial y Disponibilidad de material leñoso en el Estado de Yucatán

3.1.1 Inventarios y ecuaciones alométricas

De acuerdo con el **Inventario Forestal del Estado de Yucatán**, las selvas medianas del Estado contienen un recurso de madera de 155.76 millones de m³ Rollo Tronco Árbol (RTA), y las selvas bajas una existencia adicional de 10.70 millones de m³ RTA, en un total estimado en 166.47 millones de m³ RTA. Considerando que el 65.9 % de la superficie del Estado se considera de producción forestal y que corresponde al 81% de la superficie con vocación forestal del Estado (el resto consistente en terrenos zonificados como de conservación y restauración), se estimó que las existencias de madera del Estado, que se encuentran en las zonas de producción, son de 135.26 millones de m³ RTA. Cuando se considera que un retiro anual del 15% del volumen total de madera es sustentable, se puede estimar que se tiene una disponibilidad de 20.29 millones de m³ (15.22 millones de ton de madera, considerando una densidad de 0.75 Ton/m³ de madera) para ser utilizada en fines productivos y que representa un promedio de 6.56 m³/ha (4.92 Ton/Ha) para aprovechamiento forestal de los árboles en las zonas forestales del Estado de Yucatán.

Los resultados presentados en el Inventario Forestal se obtuvieron con el uso de **Ecuaciones Alométricas** con base a criterios de diámetros aparentes (Dap) mayores o iguales a 10 cm, que son los que permiten un uso forestal. Sin embargo, este criterio subestima la disponibilidad de biomasa, ya que no toma en cuenta especies con diámetros menores que podrían ser utilizados en otras aplicaciones como en la generación de bioenergía. La Unidad de Recursos Naturales del CICY ha realizado estudios de cuantificación de biomasa, usando criterios de Dap ≥ 2 cm, donde han obtenido valores promedios de 115.21 ton/ha de materia orgánica aérea, en una reserva de selva mediana en el sur del Estado, en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic del municipio de Oxkutzcab, siendo 106.28 ton/ha el promedio para materia viva y 8.93 ton/ha para materia muerta. Considerando una densidad de 0.75 Ton/m³ de madera y la extensión del municipio, podríamos estimar un promedio de 86.40 m³/ha de biomasa [80] el cual es mayor que el reportado en el Inventario Forestal para el municipio que es de 59.93 m³/ha.

De lo anterior, se puede ver que se tiene una subestimación de hasta un 44% de la biomasa disponible cuando se usan los datos de inventario forestal, ya que como se ha mencionado antes, estos estudios consideran diámetros de tronco mayores a 10 cm. En el caso del uso de la biomasa para fines energéticos, es necesario realizar estudios locales para conocer la disponibilidad de biomasa en la zona para dichos fines.

3.1.2 Resultados de MOFUSS

Existen otros métodos para cuantificar la biomasa que se basan en la cobertura de la vegetación y el modelado de la evolución de la biomasa con base a diferentes patrones de consumo de la misma.

Modelación para todo el Estado de Yucatán

En colaboración con el Dr. Adrián Ghilardi, se corrió el MOFUSS en el modo BaU (del inglés *Business as Usual*, es decir, siguiendo la tendencia histórica actual de consumo de leña) usando la computadora mainframe de la UNAM en el Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica (LANASE). Esta simulación permite calcular la cobertura de biomasa así como el impacto que el consumo de leña tiene sobre la vegetación. Para el estudio sobre todo el territorio del Estado de Yucatán, que ocupa un polígono de 39,340 km² de superficie y que equivale al 2.02% del territorio nacional [81], se usó el polígono mostrado en la **Figura 3.1** para el análisis de MOFUSS, en el que se aprecia el porcentaje de cobertura de árboles. En esta figura se puede observar el efecto de las zonas urbanas (el área urbana de Mérida es especialmente prominente en el noreste del estado), de los pastizales ganaderos (áreas del noroeste) y vías de comunicación principales sobre la cobertura vegetal. La vegetación es especialmente densa en el sur y sureste del Estado, donde predominan los conjuntos más espesos de bosque en extensas áreas rurales.

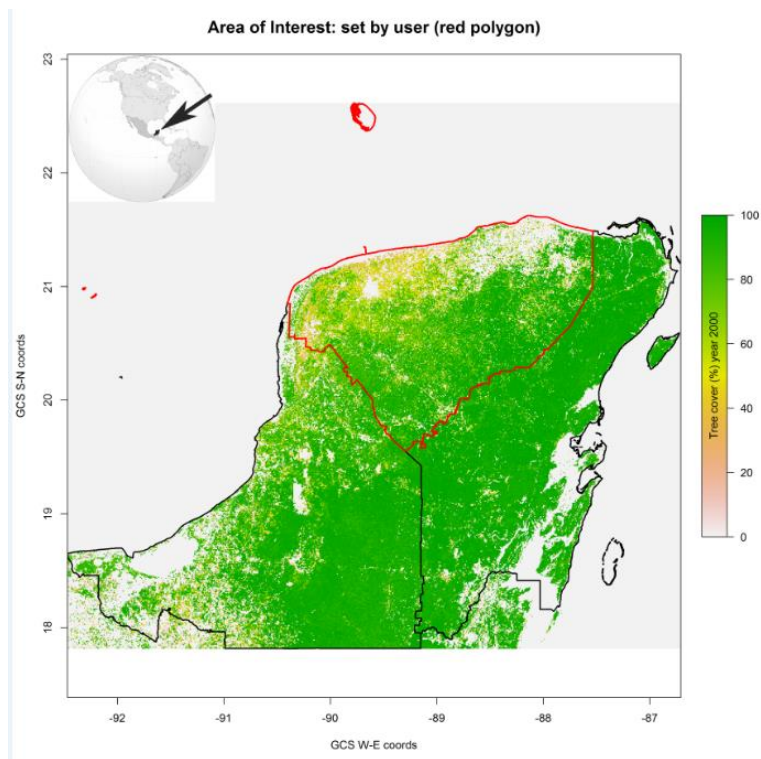


Figura 3.1 Polígono de delimitación del área del estado de Yucatán usado para el análisis de MOFUSS. Gráfica generada por MOFUSS.

Los resultados de la simulación, en forma de gráficas y mapas se muestran en la Figura 3.2 y Figura 3.3, respectivamente. En la Figura 3.2 la línea roja en cada gráfica representa el mejor ajuste generado con los parámetros iniciales, y las líneas grises las diferentes corridas en la simulación Monte Carlo tomando en cuenta la incertidumbre. En la gráfica (a) se observa un ligero incremento en la biomasa superficial (AGB, por sus siglas en inglés), obteniéndose un valor de aproximadamente 75,000,000 tDM (toneladas de material seco) para el período modelado. Con respecto a la recolección de material no renovable (NRB, en la gráfica por sus siglas en inglés), en la gráfica (b), se observa un incremento para el período pasando de 100,000 en el 2010 a 200,000 tDM en el 2040. En la gráfica (c), tenemos un incremento de la fracción no renovable (fNRB), que es el porcentaje de la leña utilizada definida como no renovable (NRB), aumentando desde alrededor 30 hasta el 45%. En la última gráfica (d), se ilustra un incremento del uso de la leña para el periodo, pasando de 350,000 a 450,000 tDM.

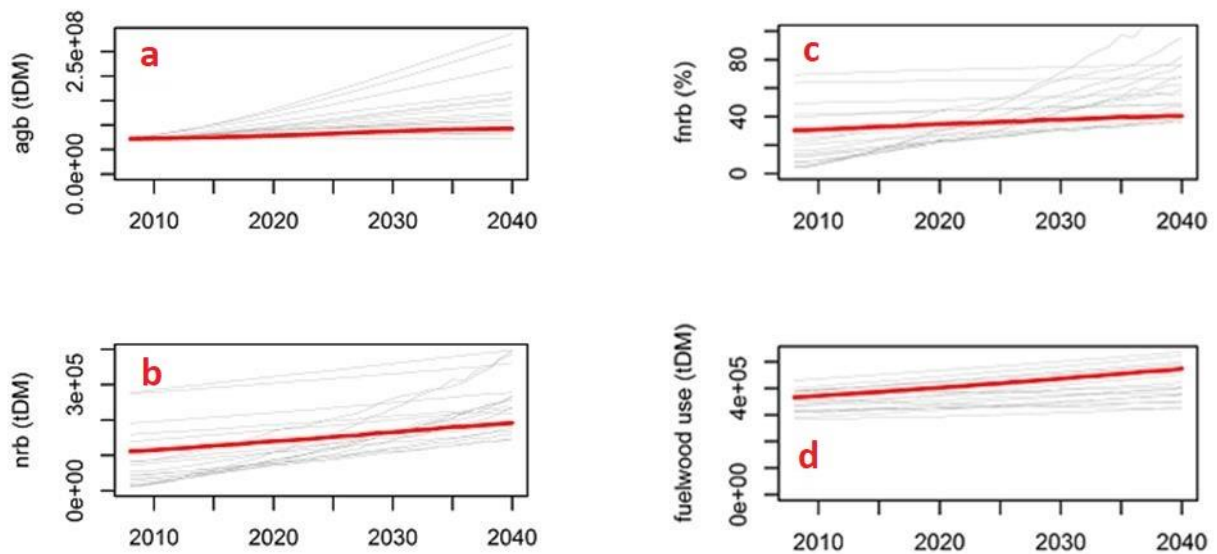


Figura 3.2 Graficas de Above ground biomass (agb), non-renewable biomass (nrb), fraction of non-renewable biomass (fnrb) de uso de leña, generados por el análisis de MOFUSS del Estado de Yucatán.

En la **Figura 3.3** se muestran los mapas generados para los valores de agb, nrb, fnrb, así como la cantidad de leña producto de la deforestación y del aprovechamiento forestal. Con respecto a la biomasa vegetal superficial, en las figuras (a) y (b) se puede observar un leve crecimiento de biomasa en el oriente y el sur del Estado para el año 2040. También se aprecia una banda de vegetación en el occidente del Estado, con un súbito salto de valores inferiores a 50 ton/ha a valores superiores a 300 ton/ha. Esta vegetación corresponde a vegetación de asociada llanuras costeras, y su agb sobresale por mucho el promedio observado. Este valor se debe corroborar ya que es probable que se esté sobreestimando el crecimiento de vegetación por la dificultad de acceso a estas zonas y el uso de un parámetro de productividad demasiado elevado. También se observa claramente que el material recolectado de manera no renovable se concentra en una amplia zona en figuras (c) y (d), principalmente alrededor de la ciudad de Mérida, en el noroeste del Estado, con valores de nrb y de fnrb de alrededor de 5 ton/ha y 10 ton/ha, respectivamente. La concentración de localidades en la región noroeste del Estado se encuentra centrada en un área que aparece como círculo irregular, que corresponde a la ciudad de Mérida, la cual, en conjunto con sus localidades periféricas aglutina alrededor del 67% de la población del

Estado (1,401,830 habitantes de un total de 2,097,175). Se muestra poca deforestación debido al consumo de leña de las localidades consideradas en el modelo (265 localidades en total), como se aprecia en las figuras (e) y (f), lo cual se puede deber a que el mayor causante de la deforestación es el cambio del uso de suelo, por expansión de las áreas urbanas.

Esta simulación en BaU (con el patrón actual de consumo), parece indicar que para el Estado, considerado en su totalidad, el ritmo de extracción de leña no superará la capacidad natural de regeneración en los próximos 30 años. Sin embargo, el aumento de la fracción de material no renovable y los mapas correspondientes, indican una presión sobre la vegetación en la región noroeste del Estado, principalmente en extensas superficies rodeando la ciudad de Mérida. Esta vegetación es de selva baja, por lo que tiene menos reservas de material leñoso y puede resultar especialmente vulnerable a la demanda de leña de la mayor concentración de población del Estado.

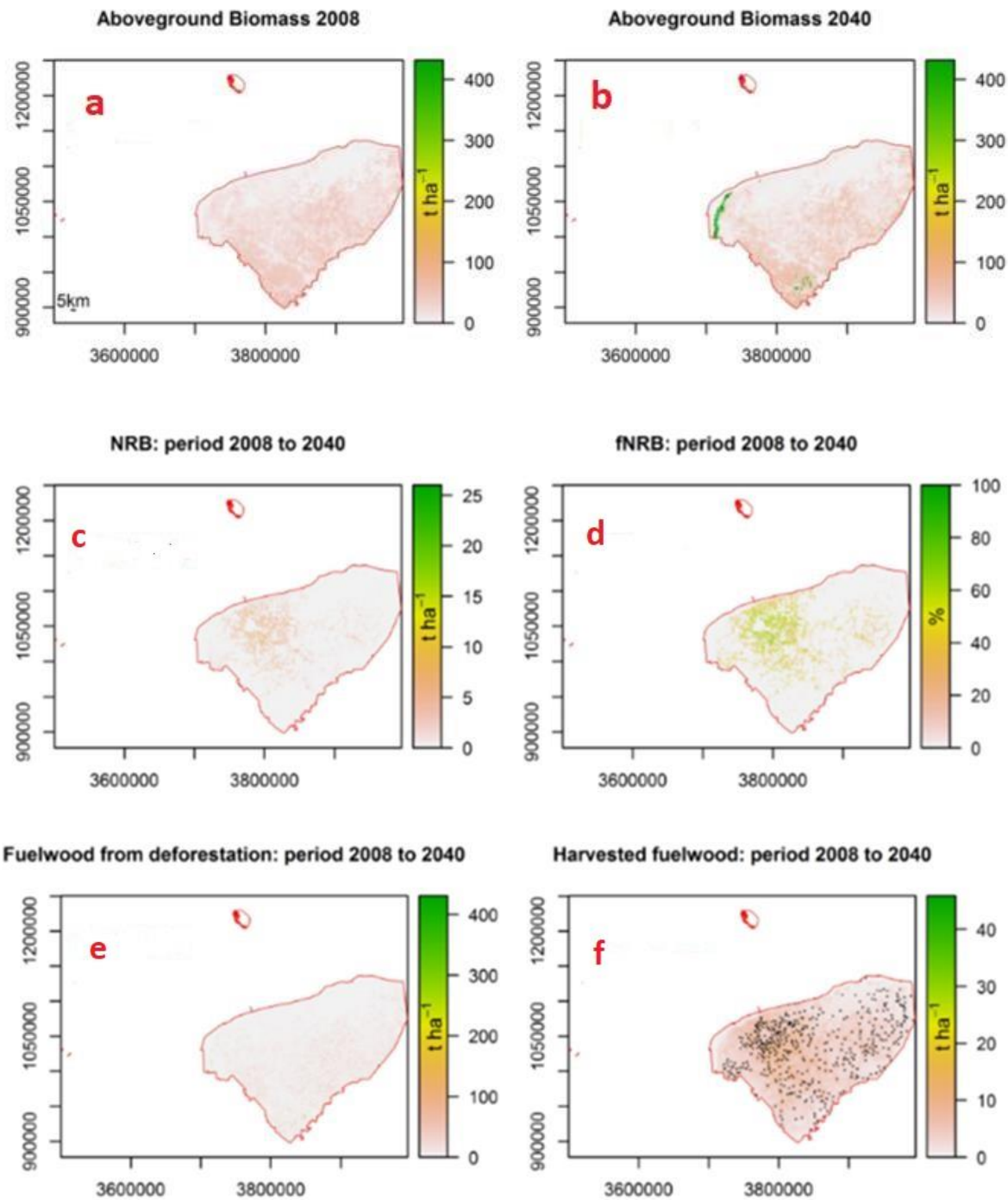


Figura 3.3 Mapas de Biomasa de vegetación, su extracción no renovable (NRB), así como leña producto de la deforestación y el aprovechamiento forestal para el estado de Yucatán, generados mediante el análisis de MOFUSS

Modelación de regiones en el Estado de Yucatán

Con el fin de tener una mejor perspectiva del impacto en el uso de la leña en regiones rurales y urbanas, se utilizó MOFUSS para investigar la sustentabilidad por regiones del estado de Yucatán. El estado se dividió en cinco regiones, denominadas por la población principal en la misma y las cuales se muestran en la **Figura 3.4**, mientras que en la **Tabla 3.1** se muestran las características de éstas, calculadas con datos del INEGI para el año 2015, [82], donde la población rural es aquella que vive en localidades con población igual o menor a 2,500 habitantes.

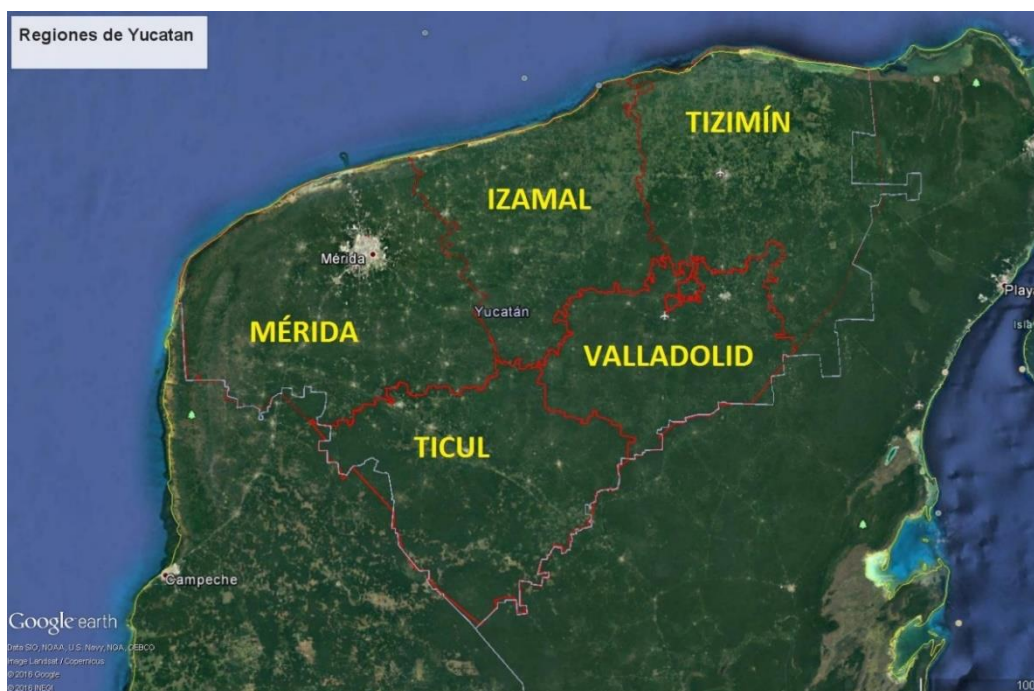


Figura 3.4 Regiones del estado de Yucatán para el análisis de MOFUSS. Elaboración propia de polígonos en Google Earth

Tabla 3.1 Características de las regiones en las que se dividió el Estado, datos de población compilados del INEGI, [82]

Regiones	Superficie (km ²)	Población (habs)	Población Urbana (habs)	Población Rural (habs)
Mérida	10,220	1,401,830	1,272,778	129,052
Ticul	7,752	202,213	159,053	43,160
Izamal	7,213	139,642	100,485	39,157
Valladolid	5,474	182,209	117,475	64,734
Tizimín	9,067	171,281	117,673	53,608

En este modelado, se utilizó la proyección BaU (*Business as Usual*), y la proyección de ICS (*Improved Cooking Stoves*) que incluye el efecto de la reducción de consumo de leña debido a la introducción de estufas ahorradoras de leña, lo que resulta una menor cantidad de leña consumido en comparación con los tradicionales fogones de tres piedras y que podría ser utilizado para otras aplicaciones en la obtención de bioenergía. La tasa de introducción de las estufas de leña se consideró del 2% anual en todas las corridas del programa. Se puede observar que el agb (*aboveground biomass*), que equivale a la leña disponible en el territorio, tiene una tendencia positiva, especialmente en el escenario ICS. El uso de leña (*fuelwood use*) muestra una tendencia al crecimiento para el escenario BaU, por el crecimiento de la población, pero este efecto es más que contrarrestado en todas las regiones con la introducción de estufas ahorradores (en escenario ICS).

En la **Figura 3.5** y la **Figura 3.6** se presentan los resultados de simulación de MOFUSS para las regiones de Mérida y Ticul, mientras que en la **Tabla 3.2** se lista el uso de leña en el año inicial de la simulación, y del año terminal, para el escenario BaU e ICS de dichas regiones. Al comparar la modelación por regiones, podemos notar que las regiones del noroeste (Mérida e Izamal) son las que menos cantidad de AGB tienen, dado el tipo de vegetación presente (selvas bajas) y la gran urbanización, especialmente en Mérida. Pero aún la región de Mérida, sometida a la mayor presión poblacional por mucho, muestra una tendencia positiva en el crecimiento de AGB en la simulación ilustrada. Las otras regiones, con selvas medianas y una menor presión poblacional muestran unos resultados incluso mejores cuando se incorpora el uso de ICS, ya que en este caso se observa una disminución del uso de leña. La diferencia en uso de leña en la simulación BaU e ICS es un ahorro en el uso de leña causado por la intervención de estufas ahorradoras en toneladas

al año. La suma de ahorros en todas las regiones es del orden de 109,000, 202,000 y 345,000 ton/año para los años 2020, 2030 y 2040, respectivamente; el cual se podría utilizar en para la generación de bioenergía mediante un sistema de gasificación, sin impacto negativo en el consumo de leña. Este material, teniendo en cuenta un rendimiento teórico de 1.2 ton/MWh en electricidad por medio de gasificación, resultaría en una producción de electricidad de 90,833, 168,333 y 287,500 MWh, para dichos años. De acuerdo al consumo promedio reportado de 1,195 KWh por habitante en zonas rurales, solamente en el 2020 con este ahorro en el consumo de leña por la introducción de estufas ahorradores de leña, se podría satisfacer las necesidades de energía eléctrica de 59,136 habitantes que corresponde a casi el 23% de la población rural del estado de Yucatán.

MÉRIDA

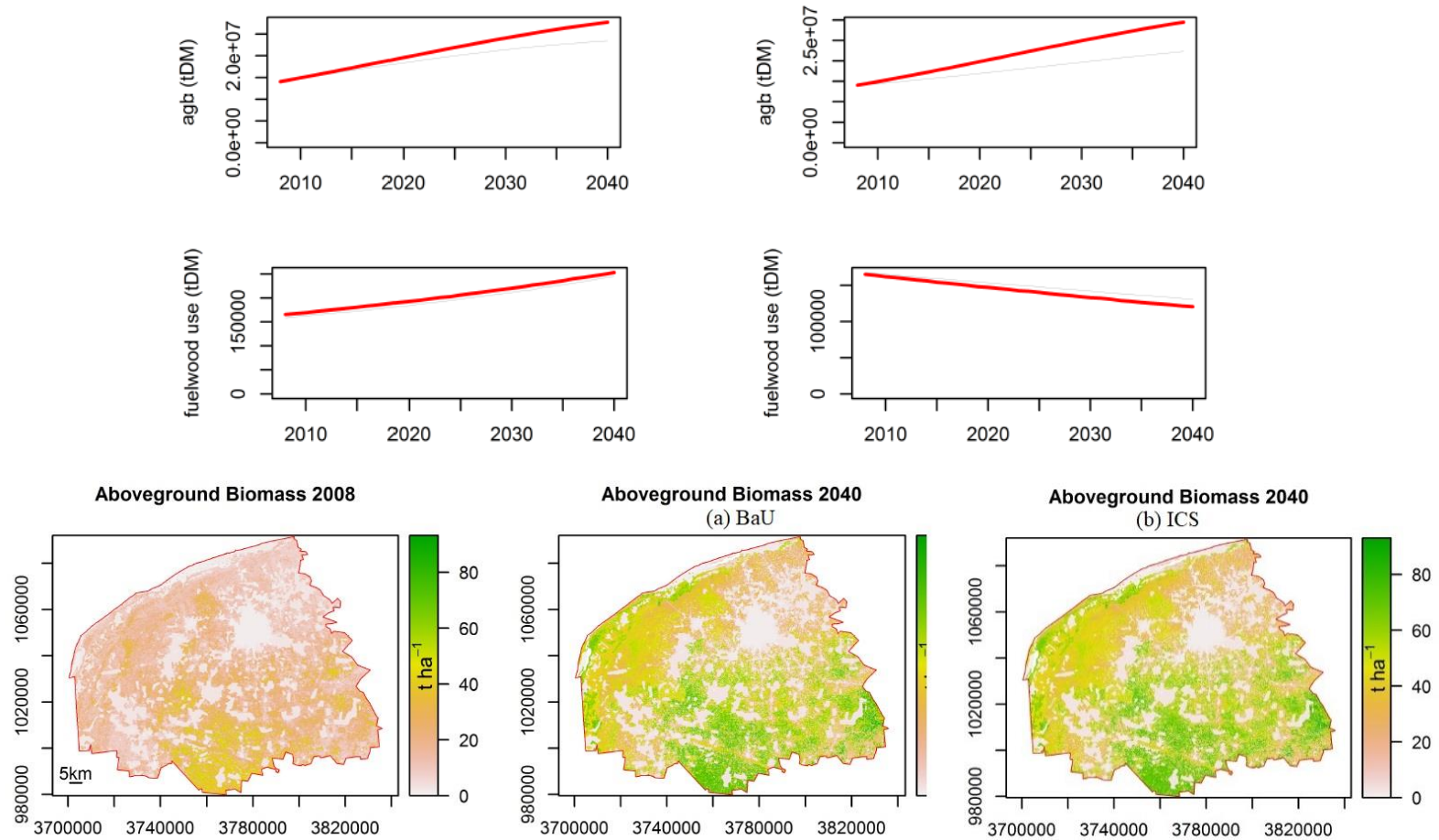


Figura 3.5 Resultados de análisis MOFUSS para la región de Mérida. Gráficos de BaU (izquierda) e ICS (derecha). Dónde agb: above ground biomass, nrb: non-renewable biomass, fnrb: fraction of non-renewable biomass, tDM:tons dry matter.

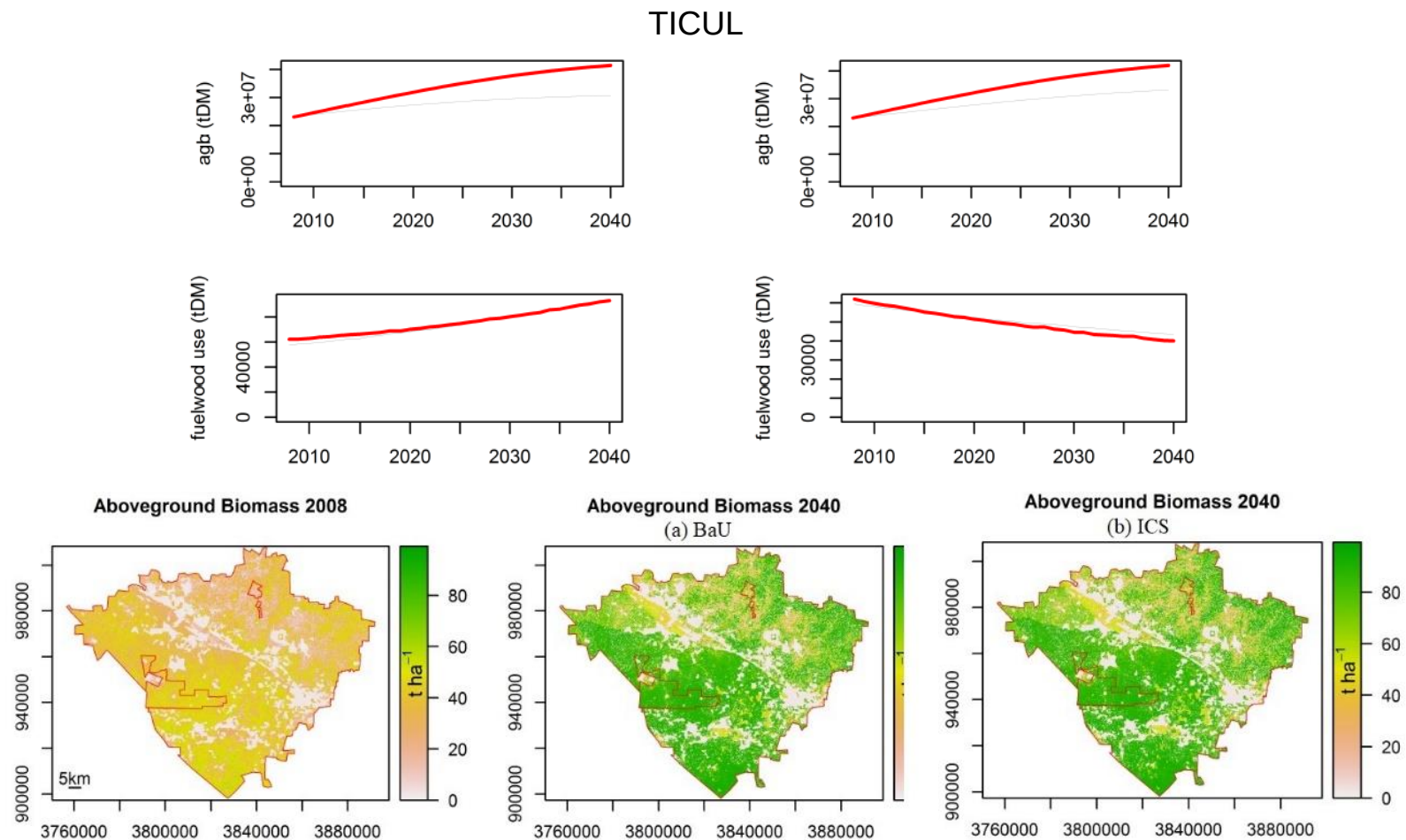


Figura 3.6 Resultados de análisis MOFUSS para la región de Ticul. Donde agb: above ground biomass, nrb: non-renewable biomass, fnrb: fraction of non-renewable biomass, tDM:tons dry matter.

Tabla 3.2 Uso de leña obtenida del modelado por MOFUSS para diferentes regiones del Estado de Yucatán.

Regiones	Uso de Leña, (miles ton)						
	2008	BaU			ICS		
		2020	2030	2040	2020	2030	2040
Mérida	160	190	220	250	150	135	120
Ticul	60	70	80	100	50	45	40
Izamal	60	70	78	100	50	45	40
Valladolid	30	35	38	50	23	18	15
Tizimín	58	65	72	90	48	43	38
TOTAL	368	430	488	590	321	286	253

3.2 Composición química de la biomasa leñosa

En la **Tabla 3.3** se muestra la composición química de las especies estudiadas. Se puede observar que la extracción de compuestos solubles en benceno/etanol presentó un máximo de 10.29% para *Lonchocarpus yucatanensis* a un mínimo de 5.54% para *Havardia albicans*. La extracción de compuestos solubles en etanol varía del 5.13% para *Senagalia gaumeri* al 0.75% para *Lonchocarpus yucatanensis*. Finalmente, la extracción acuosa presenta una variación desde un máximo de 14.33% para *Lysiloma latisiliquum* a un mínimo de 7.10% y 7.15% para *Havardia albicans* y *Neomillspaughia emarginata*, respectivamente. Los compuestos extraídos con benceno/etanol son principalmente ceras, grasas, resinas, y una porción de las gomas de madera. La extracción acuosa remueve taninos, gomas, azúcares, almidones y químicos productores de color [83]. En general, estos compuestos extraídos le dan a la planta color, olor, y tienen la función de intermediarios metabólicos, almacenamiento de energía, y sistema de capacidad de resistencia a ataques microbianos. El contenido de extraíbles totales reportados en la literatura para maderas de climas templados se encuentra en un rango del 4 al 10%, mientras que para las maderas tropicales pueden llegar al 20% [84]. Este porcentaje de extractivos para madera tropicales es consistente con los resultados obtenidos para las especies estudiadas. Las especies *Senegalia gaumeri* y *Lysiloma latisiliquum* presentaron los valores más altos de extraíbles totales con valores de 27.90% y 23.96%, respectivamente. Los valores de lignina de las

especies estudiadas, están en el rango de 17.6 para *S. gaumeri* a 23.9 para *N. Emarginata*. Estos valores fueron más bajos que los reportado para otras especies tropicales tales como especies de acacias y *Albizia pedicellaris* las que presentan contenidos de lignina hasta del 30% [87]. Esto se podría deber a que en este trabajo se usaron ramas jóvenes que están menos lignificadas en comparacion con ramas más viejas o con el tronco del árbol. En el análisis del material procesado de un árbol completo de la especie *Senegalia gaumeri*, se obtuvo un valor de extraíbles totales (26%) similar al obtenido para las ramas jóvenes (ver **Tabla 3.3**), pero con un mayor contenido de lignina (33%) y un menor contenido de holocelulosa (41%). El mayor contenido de lignina en el árbol completo en comparación con las ramas jóvenes se puede atribuir a que el tronco al tener un mayor contenido de lignina contribuye con un mayor contenido de lignina a la composición global de la biomasa leñosa. El contenido de holocelulosa varió de 54 a 63%, siendo las especies preferidas como leña las que presentaron los valores más bajos de holocelulosa.

Un elevado contenido de extraíbles y de lignina está positivamente relacionado con el contenido de energía del material leñoso [85]; por lo que las especies estudiadas podrían tener un alto poder calorífico, lo que se puede reflejar en la energía disponible para los procesos termoquímicos como la combustión. Por otro lado, un alto contenido de lignina favorece a la formación del sólido carbonoso en el proceso de pirolisis; mientras que un alto contenido de bioaceite, que favorece la formación de tars, se obtiene con materiales con alto contenido de extraíbles y de holocelulosa en ese mismo proceso. Con base a los resultados mostrado en la tabla 3.2 y considerando que para un proceso de gasificación la oxidación de la fracción carbonosa (reacción exotérmica) es la que genera la energía para las reacciones endotérmicas que ocurren en el proceso y que se tenga un menor contenido de tars, la preferencia para uso de las especies en el proceso de gasificación sería el siguiente: *Neomillspaughia emarginata* > *Havardia albicans* > *Croton glabellus* > *Lysiloma latisiliquum* > *Lonchocarpus yucatanensis* > *Senagalia gaumeri*.

Tabla 3.3 Composición química de las especies estudiadas.

ESPECIES	Extraíbles (%)			Extraíbles Totales (%)	Lignina Klason* (%)	Holocelulosa** (%)
	Benceno /Etanol	Etanol	Agua			
<i>Senagalia gaumeri</i>	8.65 (0.16)	5.13 (0.17)	14.12 (0.95)	27.90 (1.28)	17.64	54.46
<i>Havardia albicans</i>	5.54 (0.62)	4.00 (0.87)	7.10 (0.16)	16.65 (0.09)	21.57	61.88
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	4.74 (0.01)	4.90 (0.19)	14.33 (0.17)	23.96 (0.16)	21.11	56.15
<i>Croton glabellus</i>	6.63 (0.28)	2.35 (0.60)	9.21 (0.05)	18.19 (0.28)	20.59	61.22
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	10.29 (0.04)	0.75 (0.11)	8.72 (0.71)	19.66 (0.91)	19.37	62.84
<i>Neomillspaughia emarginata.</i>	8.11 (0.01)	3.05 (0.35)	7.15 (0.33)	18.30 (0.20)	23.95	57.75

Valores entre paréntesis () corresponden a la desviación estándar

* El valor promedio fue corregido por el valor promedio de extraíbles totales

** El valor promedio se obtuvo usando los valores promedios de extraíbles totales y contenido de lignina.

3.3 Análisis elemental de leña, determinación de poder calorífico y FVI

En la **Tabla 3.4** se presentan los resultados del análisis elemental de las muestras de leña y de los valores de poder calorífico obtenidos usando la ecuación de Francis y Lloyd a partir de los valores del análisis elemental. También se muestran los valores de fuel index (FVI). Se puede observar que las especies estudiadas al ser un material lignocelulósico, con lignina, celulosa y hemicelulosa como componentes mayoritarios, está compuesto principalmente de carbono y de oxígeno como elementos mayoritarios. Se obtuvieron porcentajes de carbono y de oxígeno en los rangos de 42.7-48.8% y de 46-51.6%, respectivamente. El porcentaje de hidrógeno fue bajo, con valores cercanos al 5%; aunque se detectó la presencia de azufre y nitrógeno en las muestras, éstas fueron muy bajas con valores menores al 0.1%. Los valores de poder calorífico superior, obtenidos a partir de la

composición elemental, para las muestras de madera están en el rango de 16.2 y 18.4 MJ/kg, los cuales son similares a los valores reportados en la literatura para residuos forestales y ramas de árboles. Por ejemplo, el poder calorífico reportados para la madera de álamo negro y de las ramas del naranjo fueron 18.4 MJ/kg y de 16.3 MJ/kg, respectivamente [86]. El más alto contenido de carbón en *Lonchocarpus yucatanensis* resulta en un valor de poder calorífico de 18.45 MJ/Kg, el cual fue más alto que las especies preferidas como leña (*Senagalia gaumeri*, *Havardia albicans* y *Lysiloma latisiliquum*).

Aunque el valor de poder calorífico es un parámetro importante en la selección de las especies que pueden ser usadas como leña, hay otros factores que también deben ser considerados, tales como la habilidad para producir brasas, baja humedad, fácil flamabilidad, etc. Estos parámetros son reflejados en otras características de las plantas, tales como contenido de humedad, densidad y contenido de cenizas. El valor de FVI (Fuel Value Index) toma en cuenta estas características y puede ser usado como un criterio para la selección de las mejores especies que pueden ser utilizadas como leña. En la tabla 3.5 se observa que las especies *Senagalia gaumeri*, *Havardia albicans* y *Lonchocarpus yucatanensis* tiene densidades mayores que 1 g/cm³; *Croton glabellus* y *Neomillspaughia emarginata* tienen densidades 0.88 y 0.85 g/cm³, respectivamente, y *Lysiloma latisiliquum* tuvo el valor más bajo de densidad con un valor de 0.59 g/cm³. Los más altos valores de densidades obtenidos en este trabajo con respecto a los reportados en la literatura para maderas tropicales (densidades <1), se debe a que en la literatura las densidades fueron calculadas usando el peso seco de la madera y el volumen de la madera verde. En este trabajo, la densidad se calculó usando el peso seco de la madera y el volumen de la madera a la humedad de equilibrio (8.3% a 9.8%). El contenido de cenizas varió desde un 4.8% para *Lysiloma latisiliquum* hasta un 6.8% para *Havardia albicans*. Estos valores de cenizas están de acuerdo con lo reportado para maderas tropicales. El FVI para las especies estudiadas, está en el rango de 2,177 a 4,088. Las variaciones en el FVI son debidas a la variación en la densidad, el contenido de cenizas y el contenido de humedad de las especies. Una densidad alta tiene un efecto positivo sobre el FVI mientras que altos contenido de cenizas y de humedad tienen un efecto negativo. Las especies con mayor densidad son preferidas como leña ya que mantienen las brasas por un período más largo. Se puede observar (Tabla 3.5) que el valor más alto de FVI (4,088) se obtuvo para la especie *Senagalia gaumeri* que tiene una alta densidad (1.126 g/cm³) y bajo contenido de

cenizas (5.8%). El valor más bajo de FVI (2,177) se obtuvo para la especie *Neomillspaughia emarginata* que tiene una densidad de 0.846 g/cm³ y un contenido de cenizas del 7.2%.

El contenido y tipo de minerales presentes en las cenizas es de gran importancia, ya que no solo tienen una correlación negativa con el poder calorífico del material [87], sino que adicionalmente un alto contenido de ceniza puede resultar corrosiva y ser un problema en sistemas de gasificación. Como lo reportan Hiltunen et al [88], según sus características de afectación, las cenizas se clasifican de tres maneras:

1. Ricas en calcio y potasio y pobre en sílice (por ejemplo, biomasa leñosa)
2. Ricas en sílice, pero pobre en calcio y potasio (por ejemplo, cáscara de arroz, paja y bagazo)
3. Ricas en fósforo, calcio y potasio

Tabla 3.4 Análisis elemental de muestras de madera, capacidad calorífica y FVI.

ESPECIES	Composición Elemental* (%)					Poder Calorífico MJ/kg	Humedad %	Cenizas %	Densidad g/cm ³	FVI
	C	H	O	N	S					
<i>Senagalia gaumeri</i>	44.65	5.92	49.35	0.08	0.00	17.5	8.18	5.04	1.13	3.91
<i>Havardia albicans</i>	42.66	5.64	51.63	0.00	0.06	16.30	9.86	6.83	1.03	2.46
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	43.81	5.61	50.53	0.00	0.05	16.76	8.43	4.77	0.59	2.08
<i>Croton glabellus</i>	44.81	5.71	49.44	0.00	0.04	17.3	8.65	5.27	0.88	2.88
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	48.82	5.18	45.98	0.00	0.02	18.5	8.74	5.10	1.01	3.64
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	43.61	5.22	51.11	0.00	0.06	16.20	8.74	6.38	0.85	2.15

* Composición Elemental

C: Carbono, H: Hidrógeno, O: Oxígeno, N: Nitrógeno, S: Azufre

En la **Tabla 3.5.** se muestra el análisis elemental de la ceniza de las especies. Nuestro material es de tipo 1, con tendencia a formar depósitos de CaO, CaSO₄, y K₂SO₄ en sistemas de alta temperatura que se endurecen con el tiempo [88].

Tabla 3.5 Análisis elemental, mediante EDX, de cenizas obtenidas de la calcinación de las especies estudiadas.

ESPECIES	Elemental de Cenizas, Porcentaje en peso (%)										
	C	O	Ca	Mg	K	P	S	Si	Cl	Al	Na
<i>Senagalia gaumeri</i>	12.77	49.65	35.32	1.26	1.00	--	--	--	--	--	--
<i>Havardia albicans</i>	20.29	51.21	24.38	1.19	1.77	0.39	0.22	0.57	--	--	--
<i>Lysilomalatisiliquum,</i>	28.79	43.98	17.90	0.77	5.37	1.22	--	--	1.04	--	0.92
<i>Croton glabellus</i>	26.99	49.52	19.89	1.05	1.76	--	--	--	--	--	0.79
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	20.55	49.68	26.57	0.88	2.10	--	0.24	--	--	--	--
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	19.95	49.54	20.57	3.42	5.26	0.25	0.35	--	0.51	0.14	--

3.4 Análisis termogravimétrico de leña

En la **Figura 3.7** se muestran los termogramas de TGA y DTGA de las seis especies estudiadas y en la **Tabla 3.6** se muestran los parámetros de la descomposición térmica. Se puede observar que la pérdida de masa de todas las especies con respecto a la temperatura es similar, observándose tres zonas de pérdida de masa que se atribuyen a la volatilización o descomposición térmica de los componentes de la biomasa leñosa. En la primera zona de 50-250 °C se observa la evaporación de humedad y de la fracción más volátil con una pérdida masa del 10%. En la segunda zona, en el rango 250-380 °C, ocurre la mayor volatilización del material lignocelulósico con una pérdida de peso del 57% en peso para las especies *Senegalia gaumeri* y *Lysilomalatisiliquum* y del orden del 64% para las demás especies (Tabla 3.5). Este comportamiento se puede atribuir a que estas muestras mostraron el menor contenido de holocelulosa (hemicelulosa y celulosa) que es la fracción de la biomasa lignocelulosica junto con los extraíbles que se descompone térmicamente en esta zona. Se ha reportado que el rango de descomposición de la hemicelulosa es de 280-380 °C [89] y de 295-350 °C para la celulosa [90]. La tercera zona, a temperaturas mayores de 400 °C, se observa una disminución más lenta de la pérdida de peso (del orden del 10-15%) con respecto a la temperatura. Se observa que a la temperatura de 700 °C se obtiene una masa residual que corresponde al material carbonoso que se obtiene en la descomposición térmica de la biomasa en atmósfera inerte y que parece estar relacionado con el contenido de lignina de las especies, ya que las muestras con mayor contenido de lignina también tuvieron el mayor contenido relacionado masa residual, dada la resiliencia de este material a la volatilización.

En las curvas de DTGA (Figura 3.6b) los cambios de masa se observan en forma de picos en donde el máximo del pico corresponde a la velocidad máxima de volatilización. Se observa que la máxima descomposición de masa (intervalo II de descomposición térmica) se obtuvo en el rango de temperatura de 355.5 a 365.4 °C (Tabla 3.5) y que corresponde a la descomposición de la celulosa, La descomposición de la hemicelulosa ocurre a temperaturas más bajas y se aprecia como un hombro a 300 °C. En las curvas de DTGA también se puede apreciar dos picos menores para todas las especies de madera, agrupadas alrededor de las temperaturas de 480 °C y 640 °C y que se atribuyen a la descomposición de la lignina y la remoción de volátiles residuales en la fracción carbonosa.

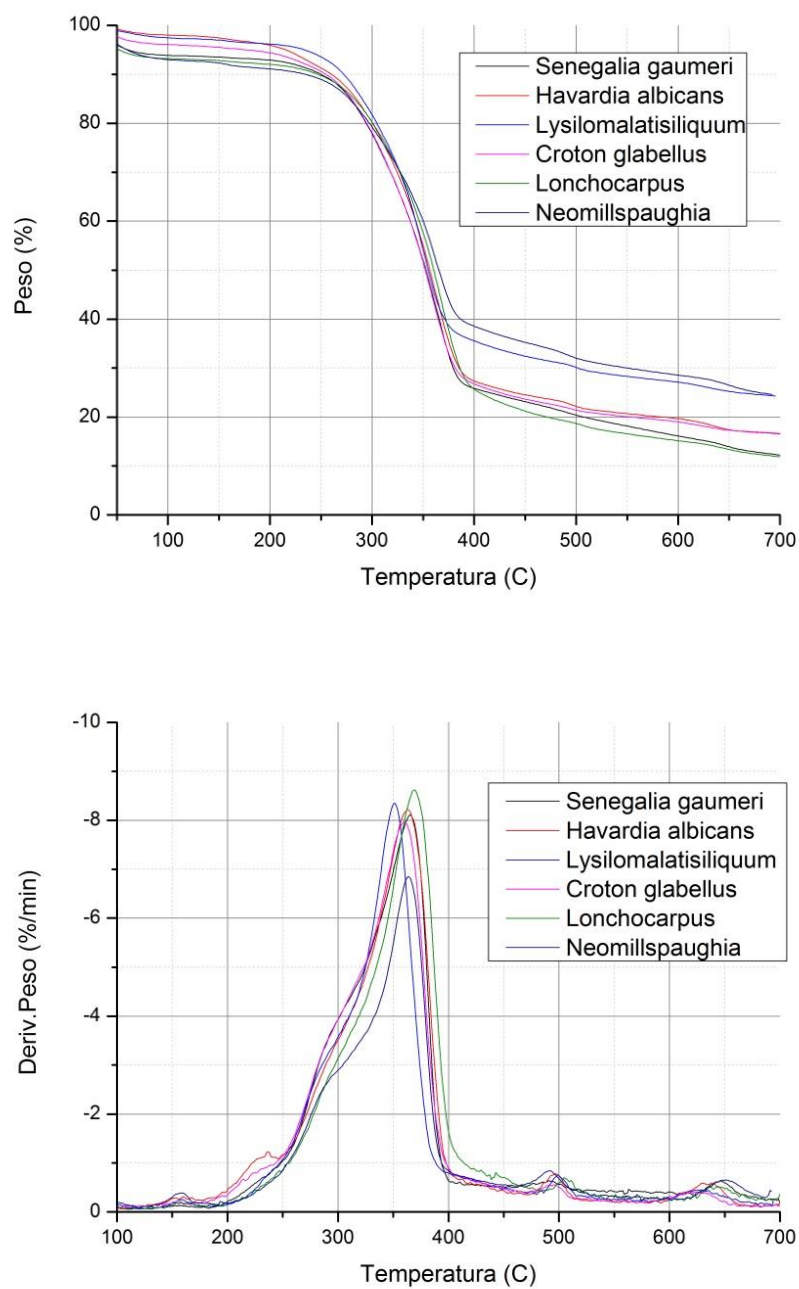


Figura 3.7 Curvas de TGA y DTGA de las especies, obtenidas usando una rampa de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno.

Tabla 3.6 Parámetros del Análisis Termogravimétrico de las especies de leña.

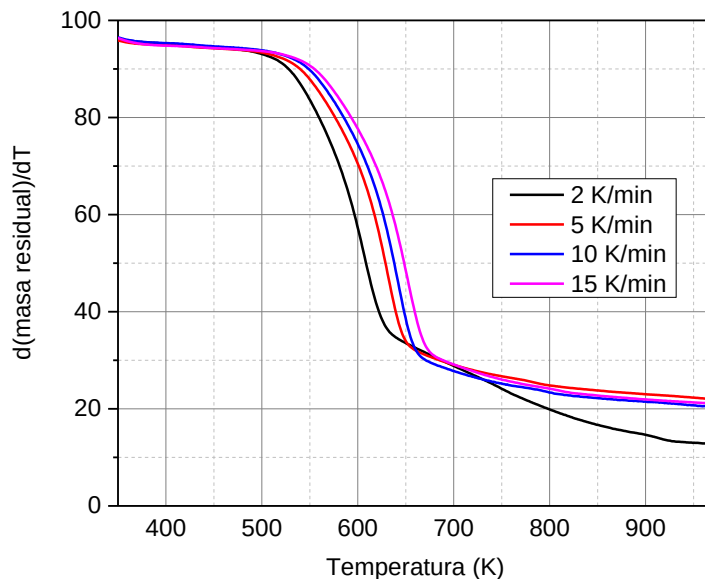
Especie	Punto de tasa máxima de pérdida (°C)	Porcentaje de Pérdida en punto de pérdida máxima	Porcentaje de masa residual
<i>Senagalia gaumeri</i>	365.4	59.8	12.20
<i>Havardia albicans</i>	362.8	55.0	16.52
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	355.5	50.4	24.32
<i>Croton glabellus</i> L.	360.3	56.4	16.59
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	364.5	55.7	11.83
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	364.3	49.1	24.59

3.5 Determinación de las variables cinéticas de reacción por medio de análisis termogravimétrico

Se determinaron las variables cinéticas de reacción del proceso de pirolisis usando las curvas de TGA y DTGA. La determinación se realizó para todas las especies, pero por espacio se presentan solamente los métodos aplicados a la especie *Lonchocarpus yucatanensis*.

En la **Figura 3.8** se muestra el efecto de la velocidad de calentamiento (2, 5, 10 y 15 K/min) sobre las curvas de TGA y DTGA de *Lonchocarpus yucatanensis*. Se observa que las curvas de TGA presentan formas similares, aunque se aprecia un desplazamiento de las curvas hacia temperaturas más altas al incrementar la velocidad de calentamiento, lo cual se refleja en una modificación de la temperatura de descomposición máxima (TD_{max}). Como se ha indicado antes, los cambios en masa en la zona 350 a 500 K se debe a la pérdida de humedad absorbida por la muestra; mientras que la pérdida de masa en la zona de 500 a 650 K se debe a la pirolisis de los extraíbles, hemicelulosa y celulosa con una pérdida de peso de 62% así como al inicio de la pirolisis de la lignina. A temperaturas más altas se termina la pirolisis de lignina y se favorece la formación de carbón que se aprecia como masa residual.

El desplazamiento de las curvas de TGA y las TD_{max} hacia temperaturas más altas se puede atribuir a los cambios en las limitaciones en la transferencia de calor. A bajas velocidades de calentamiento se provee una mayor energía térmica instantánea al sistema, que acelera la descomposición térmica y la pérdida de masa se inicia a temperaturas más bajas. A altas velocidades de calentamiento, para una misma región y temperatura, se tienen un tiempo más corto de reacción y las temperaturas necesarias para la descomposición ocurre a temperatura más altas. Los resultados obtenidos en este análisis se usaron para calcular parámetros cinéticos de energía de activación (E_a) y el factor pre-exponencial (A) usando los métodos de Kissinger, Flynn-Wall-Ozawa (FWO) y Kissinger-Akahira-Sunose (KAS).



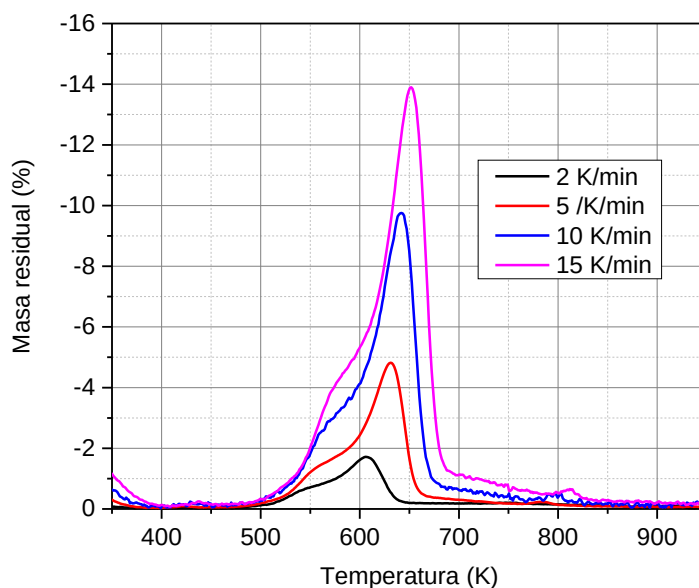


Figura 3.8 Efecto de la rampa de calentamientos sobre las curvas de TGA y DTGA de *Lonchocarpus yucatanensis*.

Los valores de TD_{max} se usaron para calcular los valores de energía de activación (E_a) y el factor pre-exponencial (A) usando el método Kissinger. En este método se usaron los los valores TD_{max} (temperatura conversión máxima obtenidos en la **Figura 3.8**, curvas de DTGA) y que corresponden a los valores de T_m de la Ecuación (9) mostrada en la Sección 2.3 En la **Figura 3.9** se muestra la gráfica de Kisinger obtenida de graficar los valores de $\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right)$, calculados usando los valores de TD_{max} para cada rampa de calentamiento contra $\left(\frac{1000}{T_m}\right)$. Se observa que se tiene una línea recta, por lo que se obtuvo la energía de activación E_a y el factor pre-exponencial A de la pendiente y el intercepto, respectivamente. Se obtuvo un valor de 233.26 para la energía de activación y de $6.35E+15$ para el factor preexponencial para la especie *Lonchocarpus yucatanensis*.

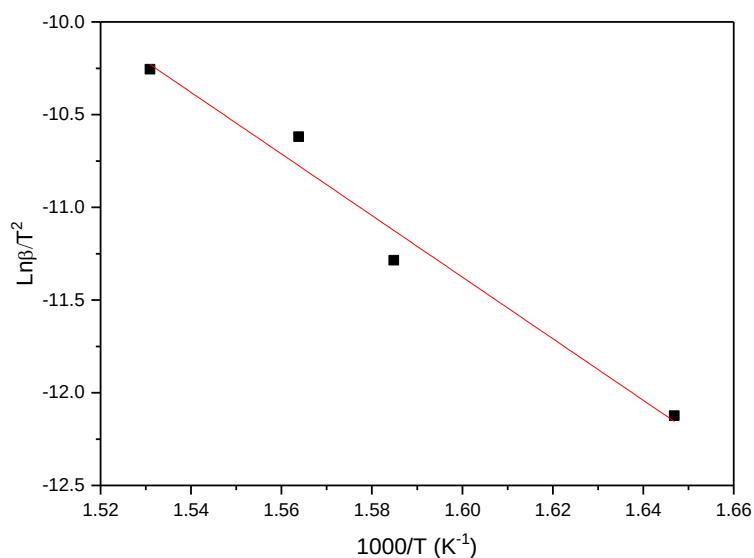


Figura 3.9 Gráfico para el método Kissinger, para la especie *Lonchocarpus yucatanensis*

En la **Figura 3.10** se muestran las curvas de conversión del proceso de devolatización para cada rampa de calentamiento. Estas conversiones se usaron para calcular los parámetros cinéticos usando los métodos Flynn-Wall-Ozawa (FWO), mostrados en la **Figura 3.11**, y Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), mostrados en **Figura 3.12**. Se puede observar que en el rango de 0.15 a 0.7 de conversión de devolatización se obtiene un buen ajuste de las conversiones para las diferentes rampas de calentamiento.

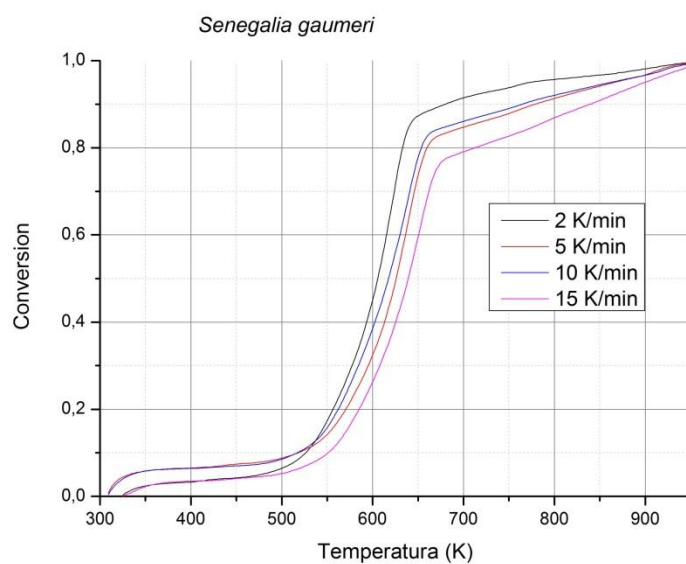


Figura 3.10 Conversión para las cuatro rampas de calentamiento, *Lonchocarpus yucatanensis*.

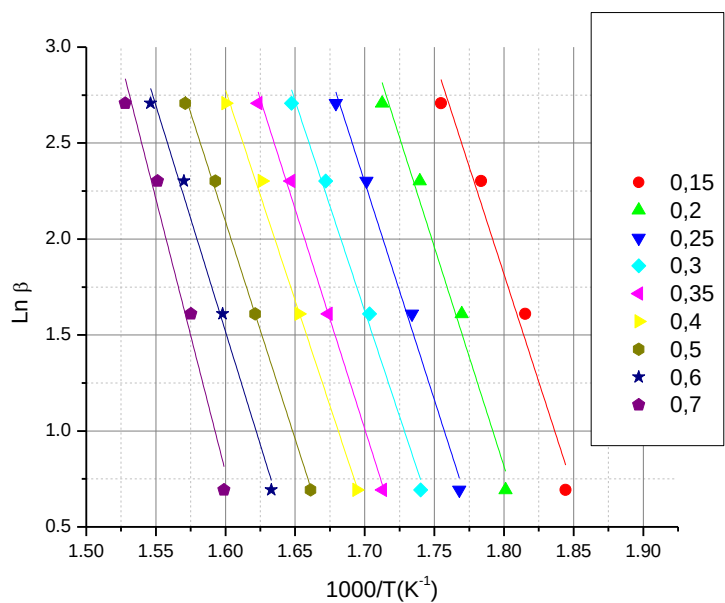


Figura 3.11 Gráfico para el método Flynn-Wall-Ozawa (FWO), *Lonchocarpus yucatanensis*.

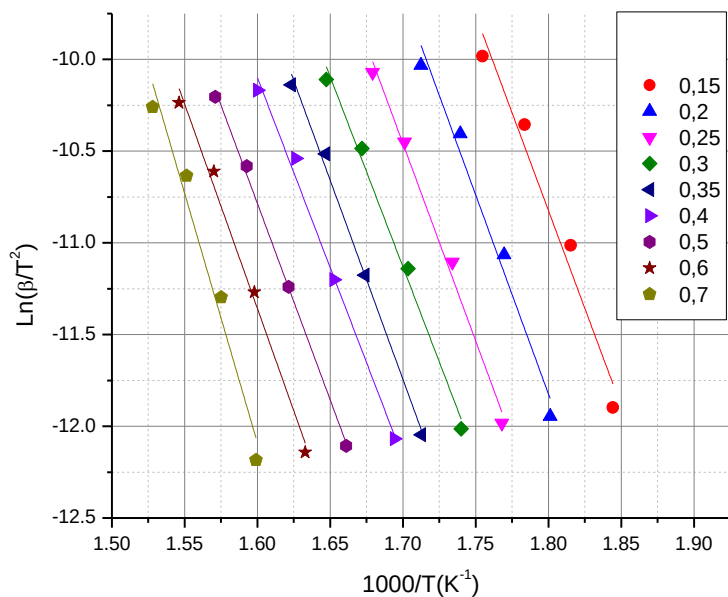


Figura 3.12 Gráfica para el método Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), *Lonchocarpus yucatanensis*.

En las **Tablas 3.7 y 3.8** se muestran los valores de E_a y de A para las conversiones de devolatilización de *Lonchocarpus yucatanensis*. Se obtuvieron valores de E_a y de A en el rango de 176 a 225 kJ/mol y de 4.45×10^{16} a 3.51×10^{18} , respectivamente. La variabilidad de la energía de activación en diferentes valores de conversión, como se muestra en las Tablas 3.6 y 3.7 de resultados de FWO y KAS para *Lonchocarpus yucatanensis*, y en general para todo material lignocelulósico, indica que la descomposición térmica de la biomasa leñosa es una reacción compleja, ya que se tiene un material con diferentes constituyentes que se descomponen a diferentes temperaturas.

Tabla 3.7 Valores obtenidos de parámetros cinéticos, método FWO, para *Lonchocarpus yucatanensis*.

METODO FWO		Constante			
slope = $-1.052Ea/R$.		-1.052			
Conversión	slope	Intercept	Adj R ²	Ea	A
0.1	-22.3896	43.6948	0.7984	176.953181	4.4502E+16
0.15	-22.4328	42.1957	0.9589	177.294607	1.4879E+16
0.2	-22.8407	41.9291	0.9730	180.518389	1.4925E+16
0.25	-22.6730	40.8398	0.9902	179.192995	6.3233E+15
0.3	-21.9146	38.8787	0.9901	173.199083	1.1046E+15
0.35	-22.9163	39.9680	0.9936	181.115884	3.6629E+15
0.4	-21.9316	37.8668	0.9900	173.33344	5.3499E+14
0.5	-22.6430	38.3193	0.9975	178.955894	1.0184E+15
0.6	-23.5580	39.2102	0.9891	186.187473	2.8629E+15
0.7	-28.4838	46.3589	0.9605	225.117869	3.515E+18
PROMEDIO				183.186882	3.6049E+17

Tabla 3.8 Valores obtenidos de parámetros cinéticos, método KAS, para *Lonchocarpus yucatanensis*.

METODO KAS		Constante			
slope = $-Ea/R$		-1			
Conversion	slope	Intercept	Adj R ²	Ea	A
0.1	-21.3169	29.125	0.7805	177.235954	9.49622E+12
0.15	-21.3212	27.5546	0.9545	177.271706	2.96288E+12
0.2	-21.7021	27.24	0.97	180.438638	2.93571E+12
0.25	-21.5127	26.1129	0.989	178.863902	1.17848E+12
0.3	-20.7338	24.1168	0.9889	172.387863	1.8518E+11
0.35	-21.7178	25.1761	0.9928	180.569173	6.52717E+11
0.4	-20.7178	23.0495	0.9888	172.254833	84854384622
0.5	-21.4058	23.464	0.9971	177.975099	1.65877E+11
0.6	-22.2999	24.3215	0.9877	185.408951	4.88818E+11
0.7	-27.2045	31.4367	0.9567	226.187463	8.56099E+14
PROMEDIO				182.859358	8.7425E+13

Los valores de la energía de activación para cada especie se ubican dentro de un rango similar al de materiales comparables en la literatura. Por ejemplo, la madera de álamo se reporta con un valor de 153.92 kJ/mol para la energía de activación y factor de frecuencia de 2.14×10^{12} , usando el método Kissinger [91], Para la madera de teca se calculó un valor de 137.12 kJ/mol para la energía de activación por un método de tercer orden, con factor de frecuencia de 3.20×10^{12} [92]. Para el tronco de palma se encontró la energía de activación de 542.07 kJ/mol y factor de frecuencia de 1.38×10^4 , usando el método de pseudo componentes [93].

Tabla 3.9 Valores obtenidos de parámetros cinéticos, todos los métodos, para todas las especies muestreadas.

ESPECIES	KISSINGER		FWO		KAS	
	Ea	A	Ea	A	Ea	A
<i>Senegalia gaumeri</i>	233.26	6.35E+15	136.03	6.99E+12	132.96	8.94E+08
<i>Havardia albicans</i>	148.78	5.53E+08	199.48	9.57E+20	197.66	3.25E+17
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	184.50	8.81E+11	185.77	6.46E+16	185.66	1.42E+13
<i>Croton glabellus L.</i>	158.52	2.91E+09	142.18	2.49E+12	139.73	2.84E+08
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	138.09	6.62E+07	183.18	3.60E+17	182.85	8.74E+13
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	204.39	1.92E+13	153.16	5.74E+15	151.41	1.08E+12
Energía de Activación, E_a (kJ/mol); Factor de Frecuencia, A (1/min)						

3.6 Pirolización y gasificación en horno horizontal

En un gasificador downdraft se aprecian cinco zonas de eventos térmicos que se llevan a cabo a diferentes temperaturas: 1) secado de la biomasa (100-150 °C); 2) pirolisis (250-500 °C); 3) combustión y 4) craqueo (800-1200 °C) y reducción (650-900 °C). Se usó un horno tubular para evaluar el proceso de pirolisis de la biomasa y de la gasificación de la fracción carbonosa obtenida en la etapa de pirolisis. En la tabla **Tabla 3.10** se presentan los rendimientos de los productos de la pirólisis de las seis especies estudiadas. Se observa que se obtuvieron rendimientos de la fracción líquida o bioaceite en el rango del 49 al 36%, siendo la especie *Lonchocarpus xuul* la que presentó el valor más alto con 48.9% y *Croton glabellus* el más bajo con 36.1%. El contenido de la fracción carbonosa varió del 30 al 25%, siendo la especie *Neomillspaughia emarginata* la que tuvo el mayor rendimiento (29.8) mientras que la especie *Senegalia gaumeri* presentó el menor rendimiento (25.0%). Los rendimientos de gases variaron entre el 34.1% para *Neomillspaughia emarginata* y el 25.7% para *Lonchocarpus yucatanensis*. Se ha reportado que estas fracciones provienen de la descomposición térmica de los extraíbles, hemicelulosa, celulosa y lignina que conforman la biomasa leñosa, ya que la descomposición de estas moléculas ocurre en el rango de temperaturas en que se lleva a cabo los procesos de pirolisis: hemicelulosa (150-350 °C), celulosa (275-350 °C) y lignina (250-500 °C) como se mostró en el análisis termogravimétrico. Estos constituyentes de la biomasa leñosa dadas sus diferencias en composición y estructura molecular contribuyen de diferente manera a los productos de pirolización. La celulosa es el contribuyente primario de volátiles condensables (bioaceite), mientras que la hemicelulosa produce en comparación más gases no condensables y la lignina dado su contenido fenólico contribuye en mayor medida a la producción de residuo carbonoso.

El bioaceite está formado por los compuestos volátiles condensables que se generan debido a la descomposición de la biomasa lignocelulósica en atmósfera inerte y es una solución acuosa de compuestos orgánicos, con baja estabilidad ya que los compuestos orgánicos tienden a condensarse y precipitar. Esta fracción contribuye a la formación de alquitranes en la corriente del gas pobre obtenido en la gasificación. La fracción carbonosa corresponde a la carbonización de los componentes de la biomasa leñosa, siendo una fracción rica en carbón y minerales que componen las cenizas. La fracción gaseosa no

condensable está compuesta por diferentes gases tales como metano, bióxido de carbono y monóxido de carbono.

Tabla 3.10 Rendimientos de las fracciones carbonosas, líquidas y gaseosas del proceso de pirolisis de las especies estudiadas. T final = 500 °C, rampa de calentamiento de 20 °C/min.

Especie	Residuo carbonoso %	Condensado líquido %	Gasificado %
<i>Senagalia gaumeri</i>	24.99	46.76	28.25
<i>Havardia albicans</i>	27.02	45.05	27.93
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	25.16	44.46	30.38
<i>Croton glabellus</i>	26.19	47.31	26.50
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	25.39	48.90	25.71
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	29.78	36.09	34.14

En la **Tabla 3.11** se muestran los rendimientos de las fracciones cuando se lleva a cabo la pirolisis de la biomasa leñosa y la gasificación de la fracción carbonosa. Se puede observar que se tiene una disminución de los rendimientos de la fracción sólida y de la fracción líquida con el consecuente incremento de la fracción gaseosa en comparación con el proceso de pirolisis (ver **Tabla 3.10**), lo que indica que durante el proceso de pirolisis-gasificación se favorece la descomposición térmica de la biomasa a la formación de gases incondensables. La introducción de aire a 700 °C, promueve la combustión del residuo carbonoso remanente, este es la única etapa exotérmica de la pirolisis y la que proporciona energía a las restantes etapas de la gasificación. La especie *Croton glabellus* es la especie que mostró la menor reducción de la fracción sólida y líquida y el mayor aumento en el contenido de la fracción gaseosa. Por otro lado, la especie *Neomillspaughia emarginata* es la que mostró el menor contenido de la fracción gaseosa.

Tabla 3.11 Rendimientos de las fracciones carbonosas, líquidas y gaseosas del proceso de pirólisis y gasificación de la biomasa leñosa. T de inicio de adición de aire = 700 °C; T final = 900 °C.

ESPECIES	Residuo carbonoso (%)	Condensado líquido (%)	Gasificado (%)
<i>Senegalia gaumeri</i>	8.94	30.57	60.49
<i>Havardia albicans</i>	7.57	31.32	61.11
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	6.38	34.74	58.88
<i>Croton glabellus</i>	4.16	29.71	66.13
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i>	7.80	37.31	54.88
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	12.10	33.27	54.63

3.6.1 Efecto de la temperatura sobre la pirólisis de *Senegalia gaumeri*

En la **Tabla 3.12** se muestran los rendimientos del bioaceite (fracción líquida), biocarbón (fase sólida) y la fase gaseosa de la pirólisis de *Senegalia Gaumeri* a diferentes temperaturas. Se observa que la fracción sólida disminuye conforme se incrementa la temperatura pasando del 24.4% a 20.8% para las temperaturas de 500 °C y 900 °C, respectivamente; el peso perdido se refleja en un incremento en la fracción líquida y gaseosa. Como se ha señalado en el análisis termogravimétrico de la biomasa leñosa, a temperaturas de 500 °C se ha perdido, como producto de la descomposición térmica, la mayor cantidad de los extraíbles, así como las fracciones de hemicelulosa y de celulosa en forma de gases condensables e incondensables, quedando como residuos una fracción rica en carbón. La pérdida de peso de la fracción carbonosa con la temperatura se puede atribuir a la pérdida de moléculas oxigenadas presentes en la fracción carbonosa, como se puede observar en la **Tabla 3.13** en donde se observa una disminución en el contenido de oxígeno de las fracciones carbonosas al incrementar la temperatura. Se observa también un incremento en el poder calorífico de los carbones, en los que se tiene un valor máximo de 31.91 MJ/kg para la fracción carbonosa obtenida a 900 °C, ya que esta muestra presenta el mayor contenido de carbono y de hidrogeno que tienen mayor poder energético.

Tabla 3.12. Efecto de la temperatura sobre la pirólisis de *Senegalia gaumeri*. Rampa de calentamiento de 30°C/min. Tiempo de residencia a la temperatura final: 30 min.

Temperatura final de Pirólisis (°C)	Rendimiento (%)		
	Bioaceite	Carbón	Gas*
500	46.89 ± 1.10	24.43 ± 0.22	28.68
700	47.09 ± 0.13	22.26 ± 0.74	30.65
900	49.17 ± 1.32	20.80 ± 0.60	30.98

* Calculado como la diferencia al 100% del rendimiento de carbón y bioaceite

Tabla 3.13 Análisis elemental de la fracción carbonosa obtenida de la pirolisis de *Senegalia gaumeri* a diferentes temperaturas

Temperatura final de pirólisis (°C)	Composición elemental (%)			Poder calorífico (MJ/kg)
	Carbón	Hidrógeno	Oxígeno	
500	79.44	1.04	19.51	24.86
700	85.27	1.48	13.24	28.59
900	87.52	2.80	9.67	31.91

En la **Figura 3.14** se muestra la evolución, monitoreada *in situ* en la zona de desfogue del gas, del contenido de los gases generados durante la pirolisis de la especie *Senegalia gaumeri*. Se puede observar que en esta etapa la composición de la fracción gaseosa cambia con la temperatura, lo que se puede atribuir a las diferentes temperaturas a las que se descomponen los componentes de la biomasa leñosa. Se observa que todos los gases presentan un máximo con respecto a la temperatura; el pico de oxígeno (O₂) se aprecia a 270 °C, el de monóxido (CO) y bióxido de carbono (CO₂) a 350 °C; finalmente, el metano (CH₄) a 500 °C. El máximo para el CO y CO₂ está acorde con la zona de descomposición de los extraíbles, hemicelulosa y celulosa; se ha reportado que el CO₂ se forma a partir de la ruptura y reconstitución de grupos carbonilos (C=O) y ácidos (COOH). El CO se obtiene de la ruptura de los grupos carbonilo (C=O) y carboxilo (C-O-C). La formación de

metano se atribuye a la ruptura de grupos metoxi ($-O-CH_3$) y ocurre como se muestra en la figura a temperaturas menores de 600 °C.

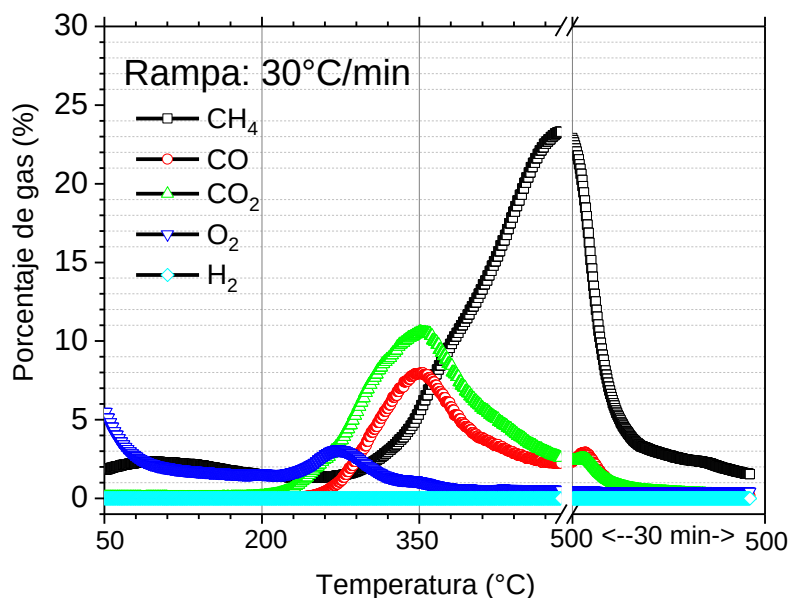


Figura 3.13. Monitoreo *in situ* de la composición de los gases de la pirólisis de *Senegalia gaumeri*.

3.7 Curvas de secado de leña para las especias analizadas

El contenido de humedad en la leña es un parámetro importante en el aprovechamiento energético de la biomasa leñosa, el cual generalmente dese ser menor al 30% en peso. Para materiales que se colectan con hasta el 60% de humedad, el proceso de secado afecta la viabilidad económica del proceso, ya que la leña húmeda tiene un menor contenido de energía en comparación con la leña seca, ya que parte de la energía generada es utilizada para la evaporación de la húmeda, obteniéndose rendimientos más bajos por peso de biomasa en la combustión. Sin embargo, en otros procesos termoquímicos como la pirólisis y gasificación, se pueden trabajar con materiales con contenido de humedad del 10% y 20%, respectivamente. También se tiene un costo asociado al proceso de secado. La velocidad de secado de material leñoso secado “al ambiente” (sin el uso de aparatos o sistemas de secado) es afectada por la especie, el grosor de la pieza, así como las condiciones climatológicas y la disposición precisa de secado, por ejemplo, protegido de

lluvias, y expuesto al aire, calentado por el sol, etc. La temperatura y humedad relativa tienen un importante efecto en el secado, debiendo estimarse con datos promedios de varios años [94].

Se ha monitoreado el secado de piezas de leña seleccionadas durante el verano del 2018, para darle seguimiento al comportamiento de secado de las especies de árbol seleccionadas como se aprecia en la **Figura 3.14**. Se obtuvo leña de material vegetal retirado debido a la expansión de la edificación en el Parque Científico, recolectando en haces (atados) en un área techada pero abierta a la influencia del clima (sin puertas y ventanas). Se observa que una madera dura, tal como la de *Senegalia gaumeri* pierde humedad a una tasa notablemente más lenta que las piezas de baja densidad, tales como las de *Lysiloma latisiliquum*. En esta gráfica se muestra la pérdida de peso, en porcentaje, en el tiempo (días) de la suma de las piezas de leña de cada especie. Se observan pérdidas de humedad en el rango del 10 al 20% del peso inicial, tendiendo a estabilizarse después de 140 días de secado, o aproximadamente cuatro meses y medio. Se puede asumir entonces, que el proceso de secado para piezas de leña puede tomar seis meses, en condiciones de sombra en el estado de Yucatán.

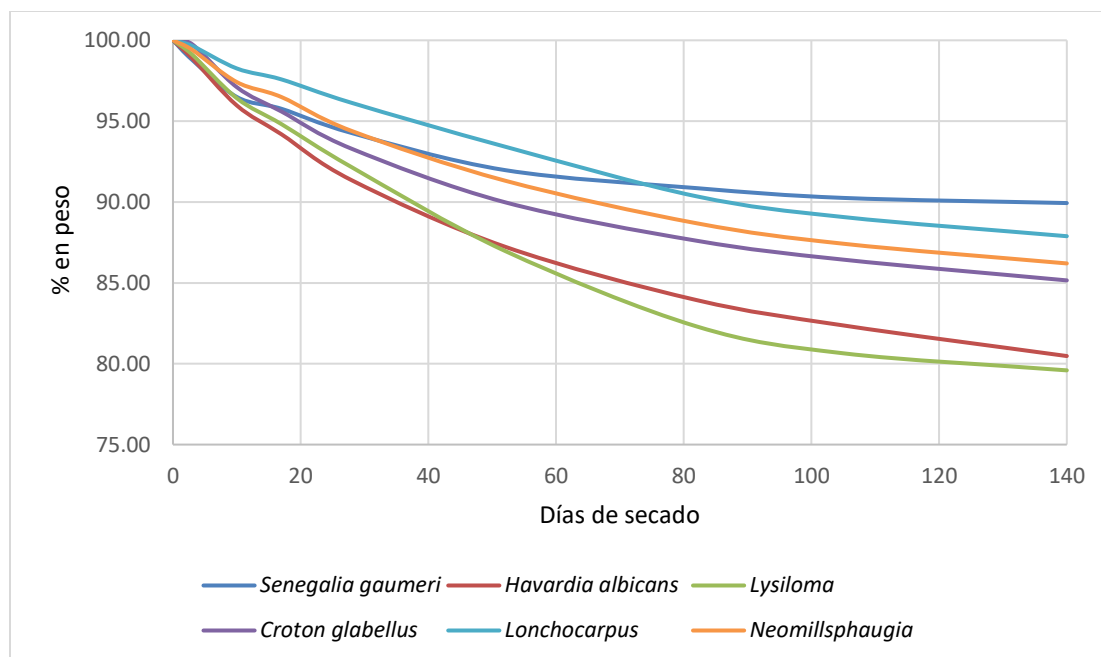


Figura 3.14 Curvas de secado para piezas de leña de las especies estudiadas

3.8 Viabilidad económica de sistema de gasificación de biomasa, sistema aislado

Para el análisis de viabilidad económica se considerará un sistema de potencia nominal de 20 kW (potencia efectiva de placa de 18 kW). El modelo fabricado en serie de esta capacidad, por la empresa APL (All Power Labs), tiene la información técnica suficiente para llevar a cabo el análisis que se desarrolla a continuación en esta sección de la tesis (Ver sección 1.4.4 Gasificadores para producción de energía eléctrica a pequeña escala). Esta escala se considera adecuada para proveer energía confiable a usuarios rurales en número suficiente, con una operación que pueda ser llevada a cabo por personal dedicado a esta tarea, con el suficiente nivel técnico.

3.8.1 Operación a diez horas

A continuación, tenemos las tablas de parámetros, para nuestro primer análisis de viabilidad económica, utilizando la metodología que se ha explicado en la sección correspondiente de la parte experimental (Sección 2.5 Viabilidad económica de sistema de gasificación de biomasa en sistema aislado para generación de electricidad).

En la **Tabla 3.14** se listan los supuestos iniciales del entorno económico del proyecto, tales como la tasa de interés, la tasa de cambio del dólar a pesos mexicanos y la inflación. La inflación es la prevalente en el segundo semestre del 2016 [95], mientras que la tasa de interés escogida es compatible con la tasa reportada por el Banco de México en ese mismo periodo [96]. El tipo de cambio corresponde a la segunda mitad de octubre 2016, y se considera un buen punto inicial de análisis. La Tabla también incluye la vida útil del proyecto, establecida conservadoramente en 10 años, y un precio de la leña de un peso por kilo. Este precio de la leña es consistente con la literatura [97] y con los precios que se verificaron en áreas cercanas a la ciudad de Mérida y los reportados en otras zonas del estado.

Tabla 3.14 Supuestos iniciales de viabilidad económica para sistema aislado.

SUPUESTOS INICIALES	
MXN/USD	18.5
Tasa de interés	6.00%
Vida útil proyecto, años	10
Inflación	3.00%
Precio leña, MXN/kg	\$1.00

En la **Tabla 3.15** de parámetros de gasificación, muestra los datos de operación que impactan la producción de electricidad por parte del sistema del gasificador. El fabricante recomienda una operación diaria máxima de 12 horas, por lo que empezamos considerando 10 horas diarias en promedio durante el año. El Factor de Utilización (FU) es un concepto importante, que intenta describir el consumo de electricidad dependiendo del uso de la potencia efectiva de un sistema con potencia nominal de 20 kW (efectivo como potencia de placa en 18 kW). La forma exacta de esta curva de consumo específico de leña parte del dato provisto por el fabricante del consumo para el 100% (de 1.2 kg/kWh) y asume una reducción a porcentajes más bajos de FU basado en literatura en diversos sistemas. La **Tabla 3.16** muestra los costos de capital y mantenimiento anuales, basados en estimaciones con la información disponible (cotizaciones con proveedores de equipos y consulta con proveedores de servicios), incluido el valor presente de 10 años de costos anuales.

Tabla 3.15 Parámetros del gasificador para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado

PARÁMETROS DEL GASIFICADOR				
Num horas operación por día	10			
Num horas operación al año	3650			
Potencia placa	18 kW			
Factor de Utilización (FU)	100.00%	80.00%	60.00%	40.00%
Producc electricidad/hr, kWh	18.00	14.4	10.8	7.2
Producc electricidad/año, kWh	65,700.00	52,560.00	39,420.00	26,280.00
Consumo específico leña, kg/kWh	1.20	1.5	1.8	2.1
Consumo leña anual, kg	78,840.00	78,840.00	70,956.00	55,188.00

Tabla 3.16 Costos para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado

COSTOS DE CAPITAL	USD	MXN
Sistema de Gasificación	\$30,000.00	\$555,000.00
Chipeadora		\$30,000.00
Estructura para sistema de gasificación		\$50,000.00
Estructura de secado y almacenamiento		\$30,000.00
Sistema de distribución de electricidad		\$10,000.00
		\$675,000.00
COSTOS ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
Sueldo del operador principal (salarios mínimos)	2	\$87,643.80
Sueldo del operador ayudante (salarios mínimos)	1.5	\$65,732.85
Mantenimiento		\$6,000.00
Gastos contingentes		\$6,000.00
		\$165,376.65
	Valor presente de 10 años	\$1,375,735.90

La **Tabla 3.17** muestra los costos de leña y su valor presente proyectado a diez años, y en la línea final, el precio mínimo deseado de electricidad (en pesos por kWh) para cada FU, que recupera la inversión en el sistema. Para tener una referencia, podemos comparar el precio de la electricidad de este sistema contra el precio que la red eléctrica nacional ofrece en Yucatán. La tarifa de la electricidad sin subsidio, para diciembre del 2016, de 4.35 pesos por kWh (incluido el impuesto) [98]. Si tomamos en cuenta el gran costo de las líneas de transmisión necesarias para conectar comunidades remotas a la red eléctrica nacional, podemos concluir que el sistema es competitivo con la red a altos niveles de Factor de Utilización.

Tabla 3.17 Valor presente de leña a utilizar en el proyecto y precios de equilibrio por kWh para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado.

Costo anual de combustible, por FU	100.00%	80.00%	60.00%	40.00%
Costo de leña, primer año	\$78,840.00	\$78,840.00	\$70,956.00	\$55,188.00
Valor presente, a 10 años	\$655,854.49	\$655,854.49	\$590,269.04	\$459,098.14
Precio mínimo deseado electricidad, MXN/kWh	\$5.60	\$7.00	\$9.10	\$12.98

Repitiendo este análisis con un generador de electricidad convencional diésel, en este caso tenemos las diferencias principales en el costo del equipo (8,500 USD), el costo de del combustible (diésel, a 17.36 pesos por litro), con un consumo específico de diésel que se incluye en la siguiente Tabla

Tabla 3.18 Parámetros del generador diésel para el cálculo de viabilidad económica para sistema aislado.

PARÁMETROS DEL GENERADOR DIÉSEL				
Num horas operación al día	10			
Num horas operación al año	3650			
Potencia placa	18 kW			
Factor de Utilización (FU)	100.00%	75.00%	50.00%	25.00%
Producc electricidad/hr, kWh	18.00	13.5	9	4.5
Producc electricidad/año, kWh	65,700.00	49,275.00	32,850.00	16,425.00
Consumo diésel (lt/hr)	7.90	5.70	4.10	3.00
Consumo diésel anual	28,835.00	20,805.00	14,965.00	10,950.00
Consumo específico diésel, lt/kWh	0.44	0.42	0.46	0.67

Graficando los precios resultantes por cada sistema, contra los diferentes Factores de Utilización, para comparar ambos sistemas, en **Figura 3.15**. Podemos notar en estos resultados que el sistema de gasificación produce electricidad a precio menor que el sistema diésel en toda la curva de Factores de Utilización.

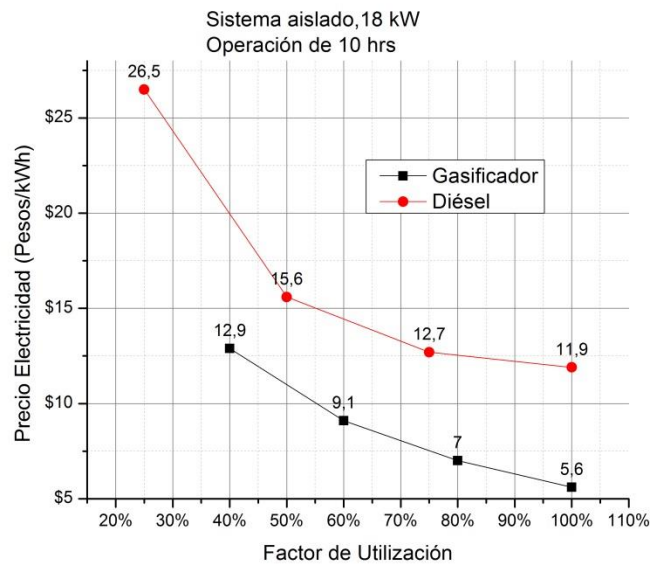


Figura 3.15 Viabilidad económica de sistema de gasificación para producción de energía eléctrica, Gráfica de Factor de Utilización contra precio de electricidad

Para explorar en más detalle la diferencia entre el sistema de gasificación y el sistema diésel, podemos ilustrar el flujo de efectivo proyectado a lo largo de la operación de ambos sistemas. Para lograr esto, convertimos el precio obtenido (que es un precio equivalente para los 10 años), a una serie de precios en cada año equivalente, afectado con una inflación del 3%. Los resultados se muestran en las **Figura 3.16** y **Figura 3.17**. En este punto es importante hacer notar que los flujos de efectivo (los flujos positivos) tienen que balancear los flujos negativos (los costos) durante el periodo de diez años. La desventaja del sistema con gasificador es el costo del sistema, que es más de tres veces superior al sistema diésel, afectando el costo de capital al inicio del proyecto (año uno). Esta desventaja del sistema de gasificación en sin embargo más que compensada por el bajo precio de la leña como combustible del sistema.

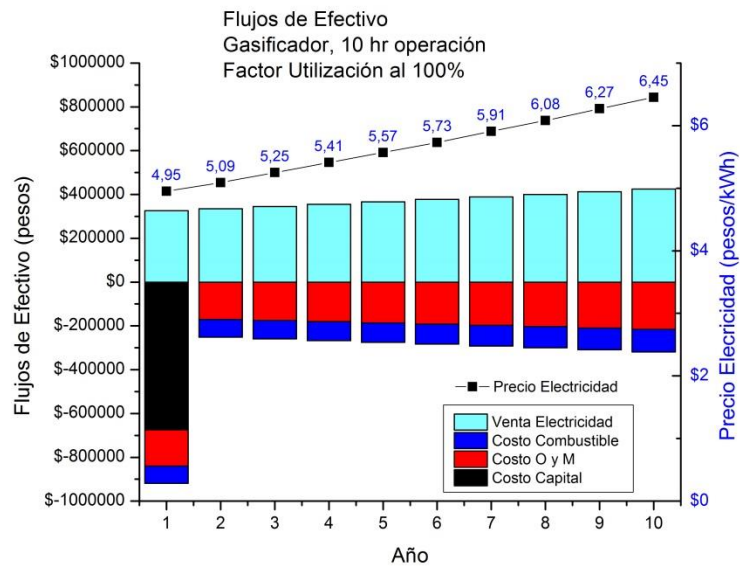


Figura 3.16 Flujos de efectivo, Sistema de gasificador operando 10 horas, Factor de Utilización al 100%

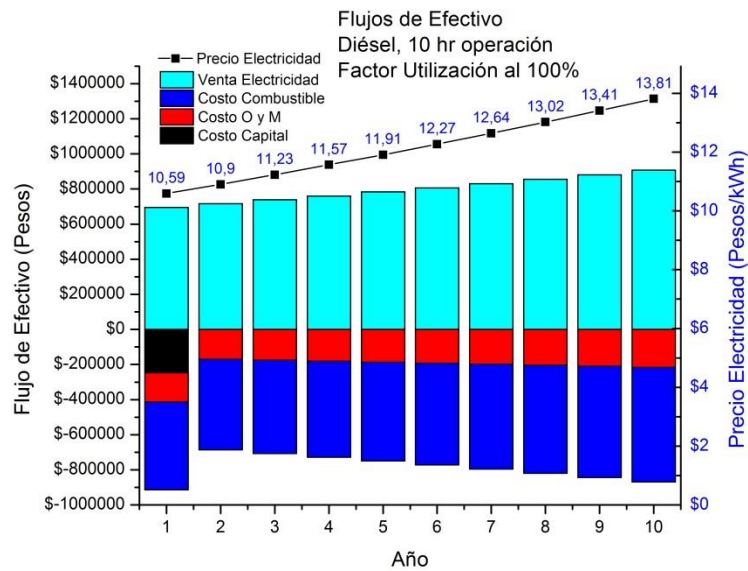


Figura 3.17 Flujos de efectivo, Sistema diésel operando 10 horas, Factor de Utilización al 100%

3.8.2 Operación a 24 horas

Repetimos el análisis anterior pero ahora deseamos una operación de 24 horas durante la operación del proyecto. En este caso requerimos tres gasificadores, ya que el fabricante recomienda periodos de operación continua máximos de 12 horas. Teniendo en cuenta el mantenimiento y reparaciones requerimos tres unidades para garantizar que una unidad estará siempre operando. En el caso del sistema diésel, dos unidades se consideran suficientes para garantizar la disponibilidad de la potencia eléctrica las 24 horas, durante todo el año. El hecho que requerimos tres unidades de gasificación erosiona la ventaja del sistema de gasificación, como puede apreciarse en la **Figura 3.18**, de hecho, igualando el precio de la electricidad producida alrededor del 50% del Factor de Utilización. En **Figura 3.19** y **Figura 3.20** se encuentran ilustrados los flujos de efectivo para cada año proyectado de la duración del proyecto, en operación de 24 horas.

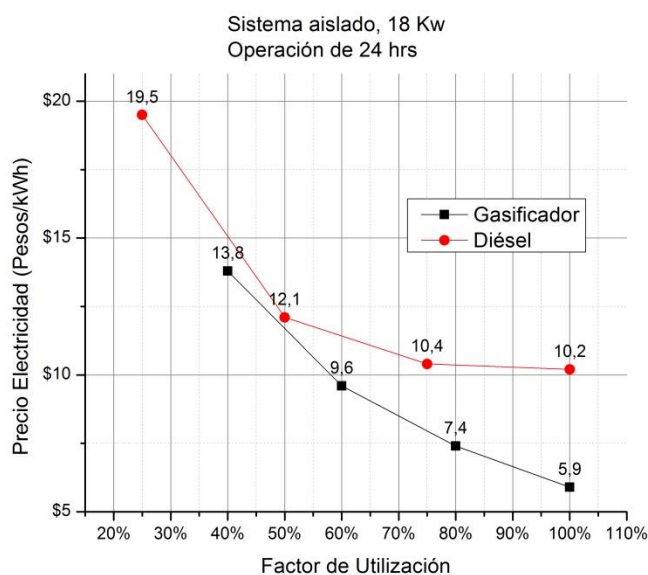


Figura 3.18 Viabilidad económica de sistema de gasificación para producción de energía eléctrica, Gráfica de Factor de Utilización contra precio de electricidad

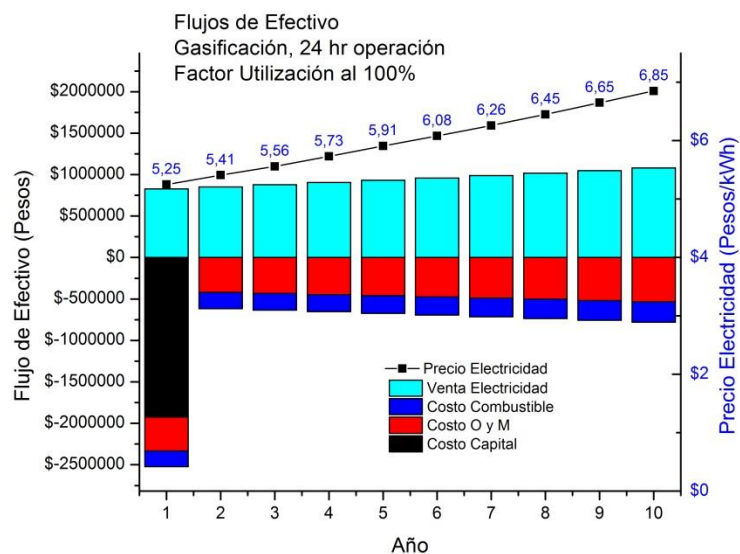


Figura 3.19 Flujos de efectivo, Sistema de gasificador operando 24 horas, Factor de Utilización al 100%

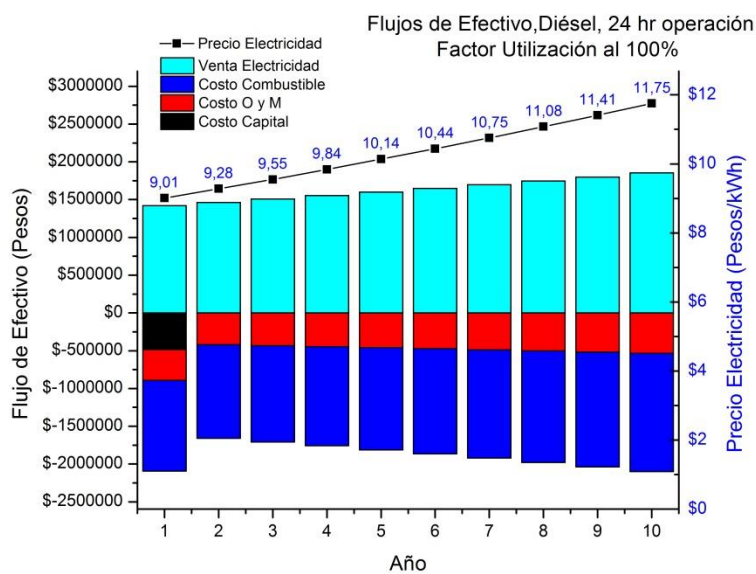


Figura 3.20 Flujos de efectivo, Sistema diésel operando 24 horas, Factor de Utilización al 100%

3.8.3 Análisis de sensibilidad

Cómo hemos podido notar la ventaja principal del sistema de gasificación en este modelaje económico es el bajo precio de su combustible en comparación con el precio del diésel. Este precio puede incrementarse al aumentar la demanda, en incrementos que dependen de la elasticidad de la oferta de leña en el sitio particular. Si suponemos que la leña al ser demandada por el sistema incrementa su precio al doble, a dos pesos por kilogramo, podemos modelar la sensibilidad del precio de la electricidad producida. En el caso del diésel, su precio se determina por factores internacionales y nacionales, con factores locales con poco peso. Modelamos en este caso un aumento de un peso, que en este caso es un aumento de 5.7%. El resultado puede verse en la **Figura 3.21**. Este análisis muestra que un aumento del combustible en términos de porcentaje tiene poco efecto en el sistema de gasificación en comparación con el sistema diésel. El aumento del precio de la leña del 100% causa un aumento del precio de la electricidad del 24% (FU al 100%), donde cada punto de porcentaje de cambio de precio de la leña causa 0.24% de aumento de precio en la electricidad; en tanto que un aumento del precio del diésel del 5.7% causa un aumento del precio de la electricidad del 4.1%, en donde cada punto de aumento de precio del diésel causa 0.71% de aumento del precio de la electricidad.

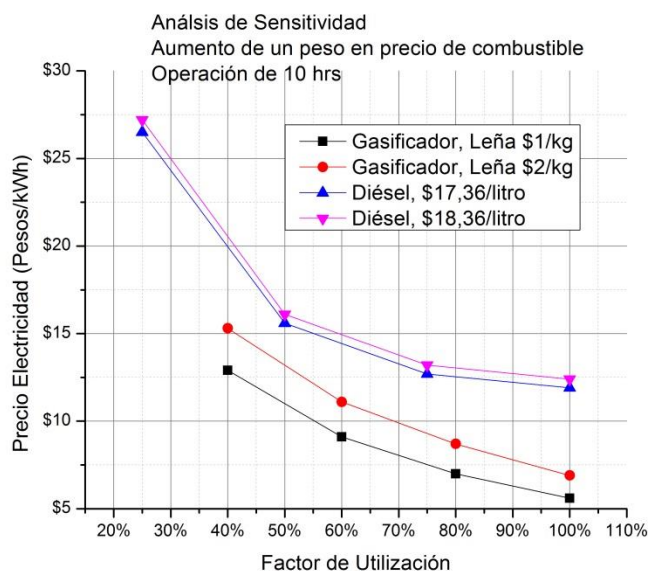


Figura 3.21 Análisis de sensibilidad, Sistema de gasificación y diésel operando 10 horas,

3.8.4 Otras consideraciones de viabilidad económica

En el análisis de viabilidad económica nos hemos enfocado a analizar esta viabilidad en sistemas aislados de la red de distribución eléctrica. Esto con motivo del subsidio considerable a la electricidad residencial, en un sistema complejo de subsidios escalonados por tramos de demanda y regiones climáticas, administrado por el único distribuidor de electricidad doméstica en el país (la Comisión Federal de Electricidad) [99]. Para considerar la viabilidad en interconexión con la red eléctrica deberá considerarse la improbabilidad de que este subsidio desaparezca, y que en algún momento se pudiera interconectar un sistema de energía de biomasa como el propuesto en un esquema de “medición neta” (*net metering*), como ya ocurre en el país con sistemas solares fotovoltaicos caseros, o de facturación neta (*net billing*), como ocurre en países como Chile en interconexión de sus sistemas solares caseros [100].

Otro enfoque interesante puede ser el análisis del sistema de gasificación operando en un sistema aislado en conjunto con un sistema solar fotovoltaico, con o sin baterías. En sistemas aislados pequeños la tecnología más comúnmente utilizada, incluyendo programas de electrificación en México, es la solar fotovoltaica. Estos sistemas utilizan baterías costosas para posibilitar la disponibilidad de la electricidad cuando la radiación solar no está presente. Un sistema de gasificación, con su capacidad despachable, puede reducir significativamente la necesidad de baterías, creando un sistema aislado más robusto.

3.9 Viabilidad en el medio rural del Estado de Yucatán de unidad de gasificación para producción de electricidad

Una vez se ha determinado la disponibilidad de material leñoso para gasificación, en cantidad y calidad; y se ha determinado su viabilidad económica, en sistemas aislados, podemos analizar la viabilidad en el contexto de las condiciones particulares del estado de Yucatán.

3.9.1 Necesidad de electrificación en el medio rural.

La Comisión Federal de Electricidad reporta crecientes niveles de electrificación para el país, resultado de la inversión pública para este fin. El último dato disponible es de 99.55% de electrificación para el final del primer trimestre de 2019 [101]. Esta tasa de electrificación representa una población de aproximadamente 9,400 habitantes sin acceso a la

electricidad, teniendo en cuenta el último censo del INEGI de 2,097,000 habitantes para el estado de Yucatán en 2015. La población sin acceso a electricidad se localiza en su mayoría en zonas rurales, con localidades muy pequeñas (de unas cuantas casas o una casa aislada). El gobierno Federal considera, en el programa de electrificación del Fondo de Servicio Universal Eléctrico, en general que, para conectar a cualquier localidad a la red de distribución eléctrica, ésta debe estar a una distancia no mayor de 5 kilómetros, ya que sería muy oneroso conectarla a la misma. Para las localidades que no cumplen con esta distancia mínima, se considera en este programa brindarles el servicio eléctrico por medio de sistemas aislados [102].

3.9.2 Modelación de casas tipo para sistema aislado en el medio rural del estado de Yucatán

De acuerdo la información técnica de la Secretaría de Energía (SENER), [103], la vivienda rural modelo que requiere ser electrificada por un sistema de generación eléctrico aislado debe cubrir como mínimo las siguientes demandas de electricidad:

Tabla 3.19 Dispositivos y electrodomésticos y sus requerimientos para sistema aislado.

Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Horas de uso	Potencia total (W)	Consumo (Wh/día)
<i>Iluminación</i>	4	11	4	44	176
<i>Ventilador</i>	1	60	3	60	180
<i>Minicomponente</i>	1	50	2	50	100
<i>Radio portátil</i>	2	15	3.5	30	105
<i>Licuadaora</i>	1	600	0.083	600	49.8
<i>Televisión LED 21 pulgadas</i>	1	30	3	30	90
<i>Dispositivo recargable</i>	2	5	4	10	40
<i>Refrigerador, 11 pies³</i>	1	95	8	95	760
TOTAL		886		919	1,500.8

De acuerdo a la demanda de potencia máxima de 0.919 kW, con un sistema como se describe en la sección 3.8.2 con electricidad de gasificación, garantizando 18 kW de potencia las 24 hrs con tres unidades, se puede atender las necesidades de electricidad de 19 casas ($18/0.919 = 19.5$). Con 19 casas con la demanda de potencia máxima descrita, sin embargo, se tendría una demanda total de 28.51 kWh por día de consumo de electricidad ($19 \times 1.5008 \text{ kWh}$). Con un sistema capaz de producir 432 kWh por día (18×24) esto resultaría en un factor de utilización del sistema de solamente 6.59%, lo cual resultaría en un costo prohibitivo del sistema, si es medido en término de costo por kWh producido. Con un factor de utilización del sistema del 100%, definido como de potencia de 18 kW (factible al tener un sistema de 3 unidades), se podría atender la demanda de 287 viviendas rurales con las necesidades descritas en la **Tabla 3.19**, en un sistema aislado. Esto sin embargo requeriría un sistema de baterías, asegurando que la demanda pico máxima es satisfecha en todo momento. No se toma en cuenta en este análisis los requerimientos de distribución eléctrica o tensión del sistema aislado, que va más allá del análisis requerido para esta investigación.

El análisis arriba, como se ha explicado, es para los requerimientos mínimos de una vivienda rural nocional. Esta vivienda consumiría 547.79 kWh en un año (1.5008×365). Para poner este dato en contexto por podemos comparar con el consumo per cápita promedio nacional en 2017, de 2,103.99 kWh [104]. Conforme las necesidades de electricidad rurales se aproximan en mayor medida a las del promedio nacional, con casas más grandes y con mayor equipamiento, el análisis del equipo de generación varía para acomodar estas necesidades.

CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en este trabajo y de acuerdo a los objetivos planteados en el mismo, se tienen las siguientes conclusiones.

1. De acuerdo con los análisis de los inventarios forestales y las mediciones realizadas de la vegetación de las selvas baja y mediana del Estado de Yucatán, se concluye que se cuenta con suficiente cantidad de biomasa para su uso en la producción de bioenergía en forma de energía térmica (leña y carbón) así como en la producción de electricidad mediante gasificación de la biomasa leñosa. Los resultados obtenidos mediante la modelación MOFUSS muestran que el consumo de leña en su forma actual (recolecta de ramas secas y verdes) no ejerce una presión sobre la vegetación local y que la introducción de estufas mejoradas resulta en una menor cantidad de uso de leña la cual puede ser utilizada para fines energéticos. Considerando únicamente el ahorro en el consumo de leña en el 2020 debido a la introducción de estufas ahorradoras de leña, se podría satisfacer las necesidades energéticas del 23% de la población rural del Estado de Yucatán
2. Las especies leñosas evaluadas presentan un alto contenido de extraíbles y cenizas, los cuales están de acuerdo con lo reportado en la literatura para maderas tropicales. Se encontró un contenido de extraíbles de 28.49% para *Senegalia gaumeri* y de 23.58% para *Lysiloma latisiliquum.*, con un contenido de ceniza de 5.04% y 4.77% respectivamente para estas especies. El alto contenido de extraíbles suele estar correlacionado con un alto poder calorífico de la leña, lo cual puede ser positivo para la obtención de energía a través del material leñoso. Por otra parte, el alto contenido en ceniza puede ser problemática, al tener el potencial de crear encostramientos y obstrucciones que reduzcan la eficiencia de un sistema de gasificación de material leñoso. Sin embargo, este problema, debido a su diseño, es menos notorio para gasificadores tipo downdraft.
3. Existen otros factores que afectan la calidad de la leña como combustible sólido, como son: la densidad, contenido de lignina, durabilidad de la braza, etc. El Fuel Value Index (FVI) toma en cuenta algunos de esos factores, siendo las especies *Senegalia gaumeri* y *Lonchocarpus yucatanensis*, las que presentaron los valores altos de FVI de 3.91 y 3.64 respectivamente, estas especies fueron las que presentaron valores altos de poder calorífico y la mayor densidad. Una alta densidad de la madera puede resultar en una

menor velocidad de secado como se observó en las curvas de secado de una madera dura, tal como la de *Senegalia gaumeri*, el material pierde humedad a una tasa notablemente más lenta que las piezas de baja densidad, tales como las de *Lysiloma latisiliquum*.

4. La cinética de la pirolisis de la biomasa leñosa, obtenida de las curvas de análisis termogravimétrico, se puede usar como criterio para la selección de las especies más apropiadas para la gasificación, ya que la pirólisis es una de las etapas de la gasificación de biomasa. Las especies *L. yucatanensis* y *H. Albicans* presentaron los valores más bajos de energía de activación, lo que indica que requieren menor energía para iniciar la descomposición térmica y su pirólisis ocurre a menor temperatura, por lo que son más apropiadas para gasificación.
5. Los resultados de pirolización y gasificación en el horno horizontal mostró variaciones en el resultado de la fracción sólida, así como de los gases condensables (bioaceite) e incondensables, lo que se puede atribuir a las diferencias en composición química de cada especie analizada. Con base a los resultados obtenidos en la caracterización de la especie y considerando que para un proceso de gasificación la oxidación de la fracción carbonosa (reacción exotérmica) es la que genera la energía para las reacciones endotérmicas que ocurren en el proceso y que se prefieren especies que genere un menor contenido de tars, la preferencia para uso de las especies en el proceso de gasificación sería el siguiente: *Neomillspaughia emarginata* > *Havardia albicans* > *Croton glabellus* > *Lysiloma latisiliquum* > *Lonchocarpus yucatanensis* > *Senegalia gaumeri*.
6. La escala escogida para la modelación de un sistema es de 20 kW de potencia nominal, como se detalla en las secciones 3.8 y 3.9. Un sistema más pequeño impondría una excesiva carga de trabajo y capacidad técnica en un reducido número de beneficiarios, y este sistema se compra con facilidad en el mercado, con por ejemplo el modelo de APL (All Power Labs).
7. El análisis de viabilidad económica se llevó a cabo en un sistema aislado, esto es, considerando una población sin acceso a energía eléctrica, con sistemas de gasificación de potencia nominal de 20 kW. Se compararon las capacidades de proveer electricidad en costo (pesos por kW/h) de sistemas a 10 horas o 24 horas de gasificación de leña contra sistemas tradicionales de combustión interna por diésel, considerando un tiempo de proyecto de 10 años y una serie de supuestos de entorno económico

afectando estos cálculos (**Tabla 3.14**). Tanto en el análisis de operación a 10 horas como a 24 horas, el sistema de gasificación resultó con ventaja en comparación con un generador tradicional de equivalente potencia de consumo de diésel, expresada esta ventaja como el precio resultante del kW/h de electricidad a diferentes factores de utilización de los sistemas. Esta ventaja del sistema de gasificación persistió en el análisis de sensibilidad de cambio del precio del combustible (leña y diésel, respectivamente).

Una vez se ha respondido a los objetivos de esta investigación, podemos concluir que la hipótesis planteada se responde afirmativamente: Existen indicaciones positivas de viabilidad técnica y económica de un sistema de gasificación para la producción de electricidad en pequeña escala en comunidades rurales del estado de Yucatán.

CONSIDERACIONES FINALES

Futuras líneas de investigación: Como futura línea de investigación se propone la evaluación del sistema de producción de electricidad por medio de gasificación como el descrito, en condiciones controladas de laboratorio, alimentando el sistema con biomasa de las especias escogidas o una mezcla de las mismas. Como siguiente paso natural se requiere instalar el sistema en campo, en alguna comunidad que pueda beneficiarse con la operación de un sistema como el descrito. De este modo podrá validarse o corregirse el análisis expuesto, y abrir nuevas líneas de análisis, tales como análisis de sistema en sistema aislado como apoyo a sistema fotovoltaico en reemplazo o combinación con baterías (sistemas Híbridos), y el análisis del sistema en interconexión con la red eléctrica nacional. En interconexión con la red nacional se debe explorar sistemas a mayores escalas, en situaciones de disponibilidad de material que pueda valorizarse con la producción de energía eléctrica, como por ejemplo en fábricas de muebles, aserraderos y otros similares. Estos sistemas pueden beneficiarse del suministro de energía a la red eléctrica en horarios pico y con beneficios para el suministro de energía eléctrica sustentable, que desplace combustibles fósiles. Herramientas para la investigación de sistemas híbridos y/o interconectados a la red incluyen el software HOMER [105] que ha sido ampliamente usado para este propósito, incluyendo sistemas híbridos con gasificación de biomasa [106,107].

Implicaciones para otras áreas del conocimiento: Cómo puede inferirse de la literatura, y de la limitada experiencia operacional con el sistema adquirido, es muy importante contar con personal de nivel técnico para el soporte operativo del sistema. El sistema tiene una complejidad mecánica y operativa que supera las habilidades de la persona promedio, especialmente tratándose de personas en áreas remotas que puedan beneficiarse de este sistema. Las implicaciones económicas, sociales y antropológicas de la instalación de un sistema eléctrico por gasificación pueden ser sustanciales. El cambio de patrón de vida, un beneficio sin lugar a dudas desde el punto de vista económico, puede requerir de dislocaciones sociales que deben ser previstas. Esto debe investigarse en conjunto con especialistas en Sociología y Antropología, con experiencia relevante a las comunidades objetivo

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bithas K., Kalimeris P. (2016) A brief history of energy use in human societies, In: Revisiting the Energy-Development Link, Springer Briefs in Economics, Springer, Cham.
- [2] Smil V. (2004) World history and energy, Encyclopedia of Energy, Elsevier.
- [3] Banco Mundial, Fossil fuel energy consumption (% of total). Fecha de acceso el 10 noviembre 2018, de sitio web del BM: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS>
- [4] NOAA, (National Oceanic and Atmospheric Administration), Earth system research laboratory global monitoring division. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> Consultado: 10 de noviembre 2017
- [5] Scheffers B. R., De Meester L., Bridge T. C. L. et al (2016) The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354 (6313), aaf7671
- [6] Secretaría de Energía (2012) Iniciativa para el desarrollo de las energías renovables en México energía de la biomasa. Presentación en el sitio web de la Secretaría de Energía: http://www.energia.gob.mx/res/0/D121122%20Iniciativa%20Renovable%20SENER_Biomasa.pdf Consultado: 5 de octubre 2018
- [7] Secretaría de Energía- Comisión Federal de Electricidad (2012) *Atlas de Almacenamiento Geológico de CO₂: México*, SENER-CFE.
- [8] Secretaría de Energía (2013) Estrategia Nacional de Energía 2013-2027, México.
- [9] Rudnick H., Mutale J., Chattopadhyay D., Saint R. (2014) Studies in empowerment: Approaches to rural electrification worldwide, *IEEE Power & Energy Magazine* 12(4), 35-41
- [10] Lahimer A. A., Alghoul M. A., Yousif F., Razykov T. M., Amin N., Sopian K. (2013) Research and development aspects on decentralized electrification options for rural household. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 314-324
- [11] Mainali B., Silveira S. (2013) Alternative pathways for providing access to electricity in developing countries. *Renewable Energy* 57, 299-310
- [12] Ahmada A. A., Zawawia N. A., HafizKasim F. et al (2016) Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 1333-1347

-
- [13] Instituto de Investigación Eléctricas, México 1981, referido en Iglesias Alvarez P., Luna Antonio R. (2013) La Biomasa, otra forma de energía sustentable en México, Universidad Tecnológica del Sureste de Veracruz.
- [14] Secretaría de Energía, SENER (2012) Iniciativa para el desarrollo de las energías renovables en México energía de la biomasa, presentación.
http://www.energia.gob.mx/res/0/D121122%20Iniciativa%20Renovable%20SENER_Biomasa.pdf Consultado: 6 octubre 2015
- [15] Balderas Torres A., Skutsch M., de Los Ríos E. (2015) Pro-poor analysis of REDD+ activities designed to tackle drivers of deforestation and forest degradation in the Yucatan Peninsula. Elaborado como parte del proyecto "REDD-Plus benefits: Facilitating countries and communities in the design of pro-poor REDD-Plus benefit sharing schemes", financiado por el Ministerio Federal Alemán del Medio Ambiente y la Conservación de la Naturaleza. Borrador.
- [16] Secretaría de Energía (SENER), Balance de Energía (2017)
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energia_2017.pdf Consultado: 10 de febrero 2019
- [17] Sistema de Información Energética (SIE). Sector Energético, Estadísticas Energéticas Nacionales, Balance Nacional de Energía: Consumo final de energía por sector (petajoules). <http://sie.energia.gob.mx/> Consultado: 14 de abril de 2018
- [18] Secretaría de Energía, SENER (2017) Reporte de avances de energías limpias.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte_de_Avance_de_Energias_Limpias_Cierre_2017.pdf Consultado: 10 de febrero 2019
- [19] Pachauri S., Spreng D. I., (2011) Measuring and monitoring energy poverty, *Energy Policy* 39, 7497-7504
- [20] García-Ochoa R., Graizbord B. (2016) Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional, *Economía, Sociedad y Territorio* 51, 289-33
- [21] CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social), Evolución de carencias sociales.
http://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Evolucion_dimensiones_pobreza_1990_2015.aspx Consultado: 22 de enero 2017

-
- [22] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), Encuesta Intercensal del 2015, número de habitantes. <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
Consultado: 22 de enero 2017
- [23] Ruiz-Mercado I., Masera O. (2015) Patterns of stove use in the context of fuel–device stacking: rationale and implications, *EcoHealth* 12, 42–56
- [24] MacCarty N. A., Bryden K. M. (2016) An integrated systems model for energy services in rural developing communities, *Energy* 113, 536-557
- [25] Sistema de Información Energética (SIE). Sector Energético, Estadísticas Energéticas Nacionales, Balance Nacional de Energía: Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público (petajoules). <http://sie.energia.gob.mx/> Consultado: 14 de abril de 2018
- [26] Sistema de Información Energética (SIE). Sector Energético, Estadísticas Energéticas Nacionales, Balance Nacional de Energía: Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público (petajoules). <http://sie.energia.gob.mx/> Consultado: 12 de abril de 2018
- [27] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2018) Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI), Uso de Combustible, Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por tipo de combustible principal para cocinar según regiones climáticas.
<http://www.beta.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/> Consultado: 5 de mayo de 2019
- [28] Durán R., Campos G., Trejo J. C., Simá P. (2000) *Listado florístico de la Península de Yucatán*, CICY (Centro de Investigación Científica de Yucatán), Mérida, Yucatán, página 15
- [29] Chiarucci A., Araujo M.B., Decocq G., Beierkuhnlein C., Fernández-Palacios J. M. (2010) The concept of potential natural vegetation: an epitaph?, *Journal of Vegetation Science* 21(6), 1172–1178
- [30] Rzedowski J, Vegetación Potencial. para shape disponible en la página web de CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad):
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/vpr4mqw.xml? httpcache=yes& xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl& indent=no Consultado: mayo 16, 2016

-
- [31] Osornio J. J., Orellana R. (1999) *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán*, Capítulo III “La conservación y el aprovechamiento del patrimonio natural”, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida Yucatán, páginas 183-194
- [32] White D. A., Hood C. S. (2004) Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula, *Journal of Vegetation Science* 15, 151-160
- [33] Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos, Yucatán, 2013, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Primera edición, páginas 70-126
- [34] Dupuy J. M., Hernández-Stefanoni J., Hernández-Juárez R. A., Tetetla-Rangel E., López-Martínez J. O., Leyequién-Abarca E., Tun-Dzul F. J., May-Pat F. (2012) Patterns and Correlates of Tropical Dry Forest Structure and Composition in a Highly Replicated Chronosequence in Yucatan, Mexico. *Biotropica* 44(2), 151–162
- [35] Urquiza-Haas T., Dolman P. M., Peres C. A. (2007) Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: Effects of forest disturbance, *Forest Ecology and Management* 247, 80-90
- [36] Huechacona Ruiz A. H. (2016) Dinámica de la producción de hojarasca y el índice de área foliar (iaf) en un bosque tropical seco en Yucatán, Tesis de Maestría, CICY (Centro de Investigación Científica de Yucatán), Mérida, Yucatán, México.
- [37] Ramírez Guardado M. A. (2015) Estimación del carbono retenido en la biomasa aérea en una selva tropical de Yucatán, México. Tesis de Maestría, CICY (Centro de Investigación Científica de Yucatán), Mérida, Yucatán, México.
- [38] Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, Nuevo Reglamento publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de febrero de 2005, TEXTO VIGENTE, Última reforma publicada DOF 31-10-2014
- [39] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2012) Manual y procedimientos para el muestreo de campo Re-muestreo, Inventario Nacional Forestal y de Suelos.
- [40] Morfín Ríos J. E., Jardel Peláez E. J., Michel Fuentes J. M. (2012) Caracterización y cuantificación de combustibles forestales, Comisión Nacional Forestal, Coordinación General de Educación y Desarrollo Tecnológico, Gerencia de Desarrollo y Transferencia de Tecnología. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.

-
- [41] Los Estudios Regionales Forestales de las UMAFORs en versión digital (PDF)
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/default.aspx?grupo=9&tema=174>
Consultado: 5 de mayo de 2016
- [42] Servicios Integrales en Agronegocios y Ambiente de S de R L de C V (2009) Estudio Regional Forestal de la UMAFOR 3102 "U KANAANTAAL SIHNAL, AC", Yucatán.
- [43] Parra V. (1989) El subdesarrollo agrícola en los altos de Chiapas, Universidad Autónoma de Chapingo, México, páginas 106-119
- [44] Quiroz Carranza J., Cantú Gutiérrez C., Díaz Jiménez R., Orellana Lanza R. (2009) Uso de la leña en Yucatán y tecnología para su aprovechamiento sustentable, CICY (Centro de Investigación Científicas de Yucatán), Mérida, Yucatán, páginas 34-38
- [45] Quiroz-Carranza J., Orellana R. (2010) Uso y manejo de leña combustible en viviendas de seis localidades de Yucatán, México. *Maderas y Bosques* 16 (2), 47-67
- [46] Fullerton D. G., Bruce N., Gordon S. B. (2008) Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world, *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 102, 843-851
- [47] Troncoso K., Castillo A., Masera O., Merino L. (2007) Social perceptions about a technological innovation for fuelwood cooking: Case study in rural Mexico, *Energy Policy* 35, 2799–2810
- [48] Masera O., Ghilardi A., Drigo R., Trossero M. A. (2006) WISDOM: A GIS-based supply demand mapping tool for woodfuel management, *Biomass and Bioenergy* 30, 618–637
- [49] Ghilardi A., Guerrero G., Masera O. (2007) Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach, *Biomass and Bioenergy* 31, 475–491
- [50] Ghilardi A., Bailis R., Mas J. F. et al. (2016) Spatiotemporal modeling of fuelwood environmental impacts: Towards improved accounting for non-renewable biomass, *Environmental Modelling & Software* 82, 241-254
- [51] Pettersen R. C. (1984) The Chemical Composition of Wood, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.
- [52] Meincken M., Tyhoda L. (2014) en *Bioenergy from Wood, Sustainable Production in the Tropics*, Seifert T, Ed.; Springer Dordrecht, Heidelberg New York London; 174-187
- [53] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2007) Biomasa Gasificación, Madrid, páginas 7-11

-
- [54] Meincken M., Tyhoda L. (2014) Biomass Quality en Bioenergy from Wood, Sustainable Production in the Tropics, Seifert T, Ed.; Springer Dordrecht, Heidelberg New York London; 169-187
- [55] Masera O. (2007) Perspectivas de la Bioenergía en México, en PPS 52 memorias, México, página 4
- [56] Görgens J. F., Carrier M., García-Aparicio M. P. (2014) Biomass conversion to bioenergy products en Bioenergy from Wood, Sustainable Production in the Tropics, Seifert T, Ed.; Springer Dordrecht, Heidelberg New York London, 137-167
- [57] Schuck S. (2006) Biomass as an energy source, *International Journal of Environmental Studies*, 63(6), 823-835
- [58] Demirbas M. F., Balat M., Balat H. (2009) Potential contribution of biomass to the sustainable energy development, *Energy Conversion and Management* 50, 1746-1760
- [59] Thornley P. (2006) Increasing biomass based power generation in the UK. *Energy Policy* 34, 2087–2099
- [60] Enggcyclopedia, Process Design, Syngas / Producer Gas.
<http://www.enggcyclopedia.com/2012/01/syngas-producer-gas/> Consultado:10 noviembre 2017
- [61] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2007) Biomasa Gasificación, Madrid, España, páginas 7-11
- [62] DFIC - Dr. Fromme International Consulting (2016) *Cogeneration & Trigeneration – How to Produce Energy Efficiently, A practical Guide for Experts in Emerging and Developing Economies*, GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit), Bonn, Alemania, página 13
- [63] Puig-Arnavat M., Carles Bruno J., Coronas A. (2014) Modelling of trigeneration configurations based on biomass gasification and comparison of performance, *Applied Energy* 114, 845-856
- [64] Puig-Arnavat M., Carles Bruno J., Coronas A. (2010) Review and analysis of biomass gasification models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2841-2851
- [65] Obernberger I. Thek G. (2008) Combustion and gasification of solid biomass for heat and power production in Europe-state of the art and future developments, Proceedings of the 8th European Conference on industrial Furnaces an Boilers, CENERTEC, Vilamoura, Portugal.

-
- [66] Alimuddin Z., Lahijani P., Mohammadi M., Mohamed A. (2010) Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2852-2862
- [67] Puig-Arnavat M., Carles Bruno J., Coronas A. (2010) Review and analysis of biomass gasification models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2841-2851
- [68] Prins M. J., Ptasiński K. J., Janssen F. J. J. G. (2003) Thermodynamics of gas-char reactions: first and second law analysis, *Chemical Engineering Science* 58, 1003–1011
- [69] Martínez J. D., Mahkamov K., Andrade R. V., Silva Lora E. E. (2012) Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines, *Renewable Energy* 38, 1-9
- [70] Milne T. A., Evans R. J. (1988) Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA.
- [71] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1986) Wood gas as engine fuel, FAO Forestry paper 72
- [72] All Power Labs, Personal Scale Power, Berkeley, Estados Unidos.
<http://www.allpowerlabs.com/products/20kw-power-pallets> Consultado: 10 Octubre 2016
- [73] Cordero T., Márquez F., Rodríguez-Mirasol J., Rodríguez J. J. (2001) Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis, *Fuel* 80, 1567-1571
- [74] Abbot P. G., Loworeb J. D. (1999) Characteristics and management potential of some indigenous firewood species in Malawi, *Forest Ecology and Management* 119, 111-121
- [75] Kataki R., Konwer D. (2002) Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India, *Biomass and Bioenergy* 22, 433 – 437
- [76] Cardoso M. B., Ladio A. H., Dutrus S. M., Lozada M. (2015) Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia, *Biomass and Bioenergy* 81, 514-520
- [77] Díez H. E., Pérez J. F. (2017) Physicochemical Characterization of Representative Firewood Species Used for Cooking in Some Colombian Regions, *International Journal of Chemical Engineering*. Volume 2017, Article ID 4531686, 13 pages
- [78] Bhatt B. P., Todaria N. P. (1992) Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs. *Commonwealth Forestry Review* 71, 183–185
- [79] Palit D., Malhotra R., Kumar A. (2011) Sustainable model for financial viability of decentralized biomass gasifier based power projects, *Energy Policy* 39, 4893-4901

-
- [80] Huechacona Ruiz A. H. (2016) Dinámica de la producción de hojarasca y el índice de área foliar (iaf) en un bosque tropical seco en Yucatán, tesis de maestría, CICY, Mérida, Yucatán, México.
- [81] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), Cuéntame, Información por entidad, Yucatán.
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/default.aspx?tema=me&e=31>
Consultado: 7 de noviembre, 2016
- [82] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), Cuéntame, Información por entidad, Yucatán, Población.
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/poblacion/default.aspx?tema>
Consultado: 15 de agosto, 2017
- [83] Basu P. (2013) *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Practical Design and Theory*, Second Edition, Dalhousie University, Canada, Elsevier.
- [84] Pettersen R. C. (1984) The Chemical Composition of Wood, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.
- [85] Demirbas A. (2009) Biofuels, Securing the Planet's Future Energy Needs, Chapter 2: Biomass Feedstocks, Springer. Páginas 45-85
- [86] Moka V. K. (2012) Estimation of Calorific Value of Biomass from its by Regression Analysis, Bachelor of Technology Thesis, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India.
- [87] Balogun A. O., Lasode O. A., MacDonald A. G. (2014) Thermo-Analytical and Physico-Chemical Characterization of Woody and Non-Woody Biomass from an Agro-ecological Zone in Nigeria. *BioResources* 9(3), 5099-5113
- [88] Hiltunen M., Barisic V., Zabetta C. Combustion of different types of biomass in CFB boilers, Sixteenth European Biomass Conference, Valencia, España, 2-6 junio 2008.
- [89] Burhenne L., Messmer J., Aicher T., Laborie M. (2013) The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis, *Journal of Applied Pyrolysis*, 101, 177-184
- [90] Yang H., Yan R., Cheng H. et al, (2006) In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: Hemicellulose, cellulose and lignin, *Energy Fuels* 20, 388-393
- [91] Słopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. (2012) Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis, *Applied Energy* 97, 491–497

-
- [92] Oluoti K., Richards T. et al, (2014) Evaluation of the Pyrolysis and Gasification Kinetics of Tropical Wood Biomass, *Bioresources* 9(2), 2179-2190
- [93] Wilson L., Yang W. et al, (2011) Thermal Characterization of tropical biomass feedstocks, *Energy Conversion and Management* 52, 191-198
- [94] Simpson W. T., Hart C. A. (2000) Estimates of Air Drying Times for Several Hardwoods and Softwoods, USDA (United States Department of Agriculture), Forest Service, Technical Report FPL-GTR-121, Madison Wi, Estados Unidos.
- [95] Banco de México, Sistema de información Económica, Índices de Precio al Consumidor y UDIS.
<http://www.anterior.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=8&accion=consultarCuadro&idCuadro=CP151&locale=es> Consultado: 15 de enero del 2017
- [96] Banco de México, Sistema de información Económica, Tasas de Referencia, Tasa de fondeo bancario.
<http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=18&accion=consultarCarritoDeSeries&idCuadro=CA52&locale=es> Consultado: 15 de enero del 2017
- [97] Ortiz Pech R., Fuentes Flores N. A., Leyva Camacho O. (2013) Extracción y Uso de la Leña en Yucatán, México: Un enfoque de Simulación Dinámica, *Quantitativa*, Vol 2 No 1
- [98] Comisión Federal de Electricidad.
http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=DACAnual2003&anio=2016 Consultado: 9 de mayo 2017
- [99] Comisión Federal de Electricidad. Nuevo esquema tarifario (Diciembre 2017 - 2019), Tarifas específicas de estímulo.
<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx> Consultado: 17 de abril 2019
- [100] Zinaman O., Aznar A., Linvill C., et al, (2017) Grid-Connected Distributed Generation: Compensation Mechanism Basics, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [101] Comisión Federal de Electricidad. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/electrificacion-por-entidad-federativa> Consultado: 17 de abril 2019
- [102] Secretaría de Energía, Boletín de Prensa 104: “99 por ciento de cobertura eléctrica nacional en 2018”. <https://www.gob.mx/sener/prensa/99-por-ciento-de-cobertura-electrica-nacional-en-2018-pjc> Consultado: 15 de abril de 2019

-
- [103] Secretaría de Energía (SENER), Fondo de Servicio Universal Eléctrico (FSUE). Catálogo de Soluciones Tecnológicas de Electrificación en Comunidades Rurales y Zonas Urbanas Marginadas. <https://www.gob.mx/sener/documentos/segunda-convocatoria-del-fondo-de-servicio-universal-electrico-fsue-para-sistemas-aislados> Consultado: 17 de abril 2019
- [104] Sistema de Información Energética (SIE), Secretaría de Energía, Dirección General de Planeación e Información Energéticas.: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE0C01> Consultado: 20 abril 2019
- [105] HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables <https://www.homerenergy.com/> Consultado: 5 de mayo 2019
- [106] Barakat S., Samy M. M., Eteiba M. B., Wahba W. I. (2016) Feasibility Study of Grid Connected PV-Biomass Integrated Energy System in Egypt, *International Journal of Emerging Electric Power Systems* 17(5)
- [107] Montuori L., Alcázar-Ortega M., Álvarez-Bel C., Domijan A. (2014) Economic evaluation of a biomass gasification plant by Homer Simulator, *Applied Energy* 132, 15-22

ANEXO - CÁLCULOS ECONÓMICOS

En el presente Anexo se proveen ejemplos de los cálculos económicos utilizados para el Análisis Económico de la operación de gasificadores de material leñosos y su comparación con sistemas tradicionales equivalentes de combustión interna, utilizando diésel. El enfoque será en ilustrar los cálculos de Valor Presente de flujos de dinero anuales (positivos o negativos) estimados a lo largo de los 10 años del período de modelación.

Para el cálculo de Valor Presente en **Tabla 3.16**, de 10 años de Costos Anuales de Operación y Mantenimiento, proyectados con inflación del 3%

Listado de cada valor anual

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\$165,376.65	\$170,337.95	\$175,448.09	\$180,711.53	\$186,132.88	\$191,716.86	\$197,468.37	\$203,392.42	\$209,494.19	\$215,779.02

$$Valor\ Presente\ Neto = \sum_{i=1}^{10} \frac{Valor\ anual_i}{(1 + tasa\ descuento)^i}$$

Para reproducir esta función, se utiliza en hoja de cálculo de EXCEL la función VNA. El Valor Presente resultado (\$1,375,735.90) de aplicar la fórmula, con tasa de descuento del 6%.

Se utiliza el mismo procedimiento para el Valor Presente de los flujos de costos de combustible del gasificador (leña):

Cálculo de Valor Presente en **Tabla 3.17**, Valor Presente de 10 años de Costos Anuales de Combustible, para cada Factor de Utilización (FU), Proyectados con inflación del 3%, con leña a 1 peso el kilo.

Listado de cada valor anual

FU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100.00%	\$78,840.00	\$81,205.20	\$83,641.36	\$86,150.60	\$88,735.11	\$91,397.17	\$94,139.08	\$96,963.26	\$99,872.15	\$102,868.32
80.00%	\$78,840.00	\$81,205.20	\$83,641.36	\$86,150.60	\$88,735.11	\$91,397.17	\$94,139.08	\$96,963.26	\$99,872.15	\$102,868.32
60.00%	\$70,956.00	\$73,084.68	\$75,277.22	\$77,535.54	\$79,861.60	\$82,257.45	\$84,725.17	\$87,266.93	\$89,884.94	\$92,581.49
40.00%	\$55,188.00	\$56,843.64	\$58,548.95	\$60,305.42	\$62,114.58	\$63,978.02	\$65,897.36	\$67,874.28	\$69,910.51	\$72,007.82

Obteniendo los Valores Presentes con la Ecuación

FU	Valor Presente
100.00%	\$655,854.49
80.00%	\$655,854.49
60.00%	\$655,854.49
40.00%	\$655,854.49

Del lado de los beneficios, la Electricidad producida en 10 años, en kWh, a diferentes FU se muestra abajo:

FU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100.00%	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00
80.00%	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00	52,560.00
60.00%	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00	39,420.00
40.00%	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00	26,280.00

Se aplica la tasa de descuento del 6% a cada flujo de electricidad (por cada FU)

FU	Valor Presente
100.00%	\$483,557.72
80.00%	\$386,846.18
60.00%	\$290,134.63
40.00%	\$193,423.09

Se aplica la Ecuación 2.21

$$P_e = \frac{C_0 + \sum_t (C_{a,t}/(1+d)^t) + \sum_t (C_{f,t}/(1+d)^t)}{\sum_t (E_t/(1+d)^t)}$$

Por ejemplo, para el Precio mínimo deseado electricidad, al FU de 100%, en MXN/kWh, en la **Tabla 3.17**

$$P_e = \frac{\$675,000.00 + \$1,375,735.90 + \$655,854.49}{\$483,557.72} = \$5.60$$

Sistema Diésel

Para la operación del sistema Diésel, los Costos Anuales de Operación y Mantenimiento se consideran iguales a los del gasificador, incluyendo la misma afectación al 3% de inflación.

También se utiliza el mismo procedimiento para el Valor Presente de los flujos de costos de combustible, en este caso diésel:

Cálculo de Valor Presente de 10 años de Costos Anuales de Combustible, para cada Factor de Utilización (FU), Proyectados con inflación del 3%, con precio del diésel a 17.36

Listado de cada valor anual

FU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100.00%	\$500,575.60	\$515,592.87	\$531,060.65	\$546,992.47	\$563,402.25	\$580,304.32	\$597,713.44	\$615,644.85	\$634,114.19	\$653,137.62
75.00%	\$361,174.80	\$372,010.04	\$383,170.35	\$394,665.46	\$406,505.42	\$418,700.58	\$431,261.60	\$444,199.45	\$457,525.43	\$471,251.19
50.00%	\$259,792.40	\$267,586.17	\$275,613.76	\$283,882.17	\$292,398.63	\$301,170.59	\$310,205.71	\$319,511.88	\$329,097.24	\$338,970.16
25.00%	\$190,092.00	\$195,794.76	\$201,668.60	\$207,718.66	\$213,950.22	\$220,368.73	\$226,979.79	\$233,789.18	\$240,802.86	\$248,026.94

Obteniendo los Valores Presentes con la Ecuación

FU	Valor Presente
100.00%	\$4,164,190.19
80.00%	\$4,164,190.19
60.00%	\$4,164,190.19
40.00%	\$4,164,190.19

Del lado de los beneficios, la Electricidad producida en 10 años, en kWh, a diferentes FU se muestra abajo:

FU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100.00%	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00	65,700.00
75.00%	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00	49,275.00
50.00%	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00	32,850.00
25.00%	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00	16,425.00

Se aplica la tasa de descuento del 6% a cada flujo de electricidad (por cada FU)

FU	Valor Presente
100.00%	\$483,557.72
75.00%	\$362,668.29
50.00%	\$241,778.86
25.00%	\$120,889.43

Para el Precio mínimo deseado electricidad, al FU de 100%, con costo de combustible a 10 años de \$4,164,190.19. y un costo de capital de \$247,250.00 tenemos el resultado en MXN/kWh,

$$P_e = \frac{\$247,250.00 + \$1,375,735.90 + \$4,164,190.19}{\$483,557.72} = \$11.96$$

De este modo tenemos la primera pareja de datos de precio de electricidad para el sistema de gasificación (\$5.60) contra el de diésel (\$11.96), operando a 10 horas, que se grafican en **Figura 3.15**.

El mismo principio se utilizó con la variación de las horas de operación (sistema a 24 horas), y la variación del precio del combustible (leña y diésel), con copiosas líneas de datos en hojas de cálculo.