



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**OBTENCIÓN DE METANO Y PELLETS DE
CARBÓN VEGETAL A BASE DE ASERRÍN DE
PINO Y RASTROJO DE FRUTILLAS:
RENDIMIENTOS Y POTENCIAL ENERGÉTICO**

TESIS QUE SE PRESENTA PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

Presentada por:

MARÍA DE LOS ÁNGELES ÁLVAREZ AYALA

Asesor: DR. MARCO ANTONIO MARTÍNEZ CINCO

Co-asesor: DR. VÍCTOR MANUEL RUÍZ GARCÍA

Morelia, Michoacán

Febrero 2021

DEDICATORIA

A mis ocho hermanos

Hermanos mayores, han sacrificado mucho de ustedes por nosotros, los menores, se los agradezco y les digo que su esfuerzo ha valido la pena.

Hermanos menores, hay una miríada de caminos, descubran tantos como puedan, no se limiten. La elección de cuál tomar es únicamente nuestra.

AGRADECIMIENTOS

Institucionales

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, particularmente a la Facultad de Ingeniería Química, la FIQ, por darme las herramientas necesarias para formarme como Ingeniera Química, a todo el personal docente y administrativo; me llevo recuerdos y experiencias de todos los que tuve el gusto de conocer, que han repercutido en mi persona y formación de manera basta.

Asimismo, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por el espacio de trabajo que me proporcionaron al lado de tantos compañeros en la investigación para poder desarrollar mi tesis. Especialmente a la Unidad de Ecotecnologías, el laboratorio de Bioenergía y al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB) por facilitarme equipos de medición, insumos y recursos para llevar a cabo la experimentación para el sustento de mi tesis. Agradezco también al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada y al Laboratorio de ingeniería en Biosistema de la Universidad de Querétaro, por su apoyo en el desarrollo de mi experimentación.

Agradezco al personal del IIES: de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones a la Ing. Atzimba López Maldonado, el M.I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada; del Laboratorio de Bioenergía, al M.C. Rene D. Martínez Bravo y de la Unidad de Ecotecnologías al M.C Alfredo Fuentes Gutiérrez, por su apoyo en facilitar vehículos, herramientas e insumos de papelería.

Agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER-CONACYT 2014-No246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos, L3 para la generación de calor para aplicaciones residenciales, por la maquinaria y apoyo económico brindado para terminar mis estudios y tesis. También agradezco a los técnicos y amigos que

siempre estuvieron al pendiente y dispuestos a apoyarme para realizar mi experimentación, especialmente Jorge Sánchez Polito, Dante Villanueva, Juan Carlos Tinoco y Saraí Ramos.

Le doy gracias a mi asesor de tesis; el Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, por darme su confianza desde el inicio de la carrera para realizar investigación con él, por su tiempo y apoyo.

Agradezco a mi co-asesor; el Dr. Víctor Manuel Ruíz García, por creer en mí y ayudarme en cada paso del desarrollo de esta tesis. También por sus comentarios, sus correcciones siempre tan amables y sutiles, su confianza y la seguridad que me dio para poder desarrollar este trabajo. Encontré más que un asesor, un amigo.

Personales

Le agradezco a mis padres, Pedro y Guillermina, por su amor incondicional, su tolerancia, su respeto a mi decisión de ser una profesionista y por ser mi sustento durante la carrera estudiantil. Agradezco a mis hermanos: Wen, Emilio, Eliseo, Fermín, Álvaro, Abraham, Rocío y Fátima, que, a su manera, me han dado su confianza y apoyo. Y a todos esos familiares que siempre han estado al pendiente de mi desarrollo, brindándome su apoyo incondicional.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos de la facultad con quien compartí experiencias increíbles durante estos 5 años, además de penas y alegrías. Estoy segura de que nos volveremos a encontrar y viviremos muchos momentos más, como amigos y como profesionistas. Sin embargo, quiero hacer un agradecimiento especial a esos compañeros y amigos que tuvieron una intervención singular en mi vida académica y personal: Jacqueline Vergara, Alberto Toral, Lety Navidad Alvarado, Marlen Naranjo, Paola Ríos, Elizabeth Flores, Alina Martínez y Osvaldo Martínez. Viene conmigo un pedacito de ellos que me ha permitido convertirme en lo que soy.

También agradezco a esos amigos que he conocido a lo largo del viaje, con quien he fortalecido vínculos pese a los caminos distintos que hemos emprendido todos; Leticia Cortés, Sheccíd García, Luis Ángel Ortiz, Fernando Arceo, Alejandro Bucio, Guillermo

Aguilera, Luis Gerardo García, Miguel Ángel Rojas. Agradezco la motivación y amistad que he encontrado en cada uno de ustedes.

Es muy grato conocer a alguien que te recuerde lo fascinante que es observar todo con el asombro de cuando niños y, aún mejor, te permita serlo y disfrutar de la vida de esa manera. Por todo esto y por tantas experiencias, además de por el apoyo y motivación constante a aprender, preguntarse, dudar, conocer, le agradezco a Pablo.

ÍNDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
Institucionales	II
Personales.....	III
NOMENCLATURA	1
GLOSARIO	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	8
ABSTRACT	10
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	12
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos particulares.....	16
1.3 JUSTIFICACIÓN	17
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 ANTECEDENTES.....	19
2.2 BIOMASA	21
2.2.1 Clasificación general	21
2.2.2 Biomasa agroforestal.....	22
Residuos del cultivo de frutillas	25
Residuos de la producción forestal	26

2.2.3 Bioenergía	28
2.3 BIOCOMBUSTIBLES	29
2.3.1 Biocombustibles líquidos.....	30
2.3.2 Biocombustibles gaseosos.....	31
Metano.....	31
Caracterización.....	32
2.3.3 Biocombustibles sólidos.....	32
Pellets y Briquetas.....	32
Pretratamientos.....	33
Humedad	34
Reducción de tamaño de partícula	34
2.3.5 Procesos de conversión de la biomasa	34
2.4 GASIFICACIÓN	36
Capítulo 3. METODOLOGÍA	40
3.1. Caracterización de las materias primas	40
3.1.1 Tamaño de partícula.....	40
3.1.2 Determinación de la humedad.....	41
3.1.3 Análisis elemental.	41
3.2 Producción de Metano y Carbón vegetal	42
3.2.1 Operación del reactor de gasificación	42
3.2.2 Efecto de la temperatura, catalizador y materia prima en el rendimiento de producción del metano y carbón vegetal	44
ANOVA	45
3.2.3 Análisis de gases a la salida del gasificador.....	48
3.3 Elaboración de pellets	50

Capítulo 4. RESULTADOS	52
4.1 Caracterización de las materias primas	52
4.2 Producción de metano y carbón vegetal.....	54
4.3 Análisis estadístico del efecto de las variables supuestas de importancia en la producción del metano y carbón vegetal	57
4.3.1 ANOVA para el carbón vegetal	58
4.3.2 ANOVA para metano.....	63
4.4 Elaboración de pellets	68
Capítulo 5. CONCLUSIONES	71
Capítulo 6. RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74
APÉNDICES	79
APÉNDICE A. Rango de temperatura para la gasificación.....	79
APÉNDICE B. Composición del gas producto de la gasificación.....	80
APÉNDICE C. Cálculos para la humedad de la materia prima.....	82

NOMENCLATURA

γ -Al₂O₃. Gamma Alúmina.

ANOVA. Análisis de Varianza.

C. Carbono.

D. Diámetro en milímetros.

CH₄. Metano.

CO. Monóxido de carbono

CO₂. Dióxido de carbono.

EIA. Administración de la Información energética de los Estados Unidos.

GEI. Gases de efecto invernadero.

H₂. Hidrógeno.

Hbh. Humedad en base húmeda

L. Longitud en milímetros.

LINEB. Laboratorio de Evaluación e Innovación de Estufas de Biomasa.

LANIES. Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad

Ni. Níquel.

N₂O. Óxido nitroso.

O₂. Oxígeno.

OMM. Organización Meteorológica Mundial.

PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

S. Azufre.

SD. Desviación estándar.

SENER. Secretaria de energía.

TGA. Analizador termogravimétrico

VOC. Compuestos orgánicos volátiles.

GLOSARIO

Biochar. Carbón vegetal, material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno (IBI, 2012),

Chapa. Lámina delgada de madera de dimensiones variables obtenida por el torneado o rebanado de la madera en rollo, que se utiliza para ser pegado con otro material.

Durmiente. Pieza de madera escuadrada utilizada como soporte de vías férreas.

Escuadría. Madera rolliza destinada a la producción de tablas y tablones, vigas, material de empaque y cuadrados para herramienta, principalmente.

Gasificación. Proceso termoquímico en el que la biomasa es transformada en un Syngas.

Homocedasticidad. Homogeneidad en las varianzas, es decir, varianza constante en los diferentes niveles de un factor.

Pirólisis. Proceso térmico mediante el cual la materia se descompone químicamente por efecto de la temperatura, bajo una atmósfera deficiente de oxígeno. Para ello se emplean altas temperaturas y cámaras cerradas.

Preclareo y aclareo. El preclareo es una técnica que sirve para distribuir correctamente la población de árboles en los terrenos. Se realiza cuando hay árboles que crecen al mismo tiempo y su diámetro es menor a 10 centímetros, pero que se encuentran muy juntos; uno de ellos, o varios, pueden haber crecido mal, chuecos o con mal desarrollo, por lo que son seleccionados para cortarse y dejar que los árboles más sanos o con mejor desarrollo se logren y se extraiga la mejor madera. El aclareo se realiza después y cuando los árboles son mayores, de mayor diámetro (de 10 a 50 centímetros). Sirve para continuar con la distribución y mejoramiento de la población de árboles, iniciadas con los preclareos.

Syngas. Gas de síntesis, que contiene cantidades variables de Monóxido de carbono (CO) e Hidrógeno (H₂).

Tamizar. Es un método de separación de una mezcla de granos o partículas en 2 o más fracciones de tamaño, los materiales de gran tamaño son atrapados por encima una malla, mientras que los materiales de tamaño menor pueden pasar a través esta y retenidos por otras mallas inferiores.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energía primaria por fuente de energía en el mundo. Fuente: IEA (2019), International Energy Outlook 2019	13
Figura 2. Índice de independencia energética Fuente: Sistema de Información energética, SENER	14
Figura 3. Participación de las tecnologías renovables en las adiciones de capacidad 2018-2032 Fuente: Sistema de Información energética, SENER.....	15
Figura 4. Producción forestal maderable nacional por volumen en porcentaje. SEMARNAT, 2016	26
Figura 5. Contribución de especies al volumen de producción maderable. SEMARNAT, 2016	27
Figura 6. Destino de la producción forestal por producto. SEMARNAT, 2016	27
Figura 7. Ciclo del carbono en la biomasa	28
Figura 8. Trituradora de ramas y hojas (Izquierda). En la derecha, tamiz de rastreo de frutillas (Arriba). Tamiz de aserrín de pino (abajo).....	40
Figura 9. Secuencia de la determinación de humedad.....	41
Figura 10. Gasificador EMII-02 (izquierda), Diagrama del Gasificador EMII-02 (Derecha). Elaboración propia.....	42
Figura 11. Diagrama P&ID del gasificador EMII-02. Elaboración propia	43
Figura 12. Instalación del GASIFICADOR EMII-01 y equipos de muestreo.....	48
Figura 13. Cromatógrafo Analizador de Gases Young Li Instrument 6500	48
Figura 14. El Diagrama P&D de la izquierda muestra en rojo los lugares donde se tomará muestra. En la izquierda se aprecia el diagrama final, con las salidas para muestreo en color rojo.	49
Figura 15. Peletizadora. (Ríos, I., 2017).....	50
Figura 16. Proceso de peletizado en la primera ronda de la mezcla B1.	51

Figura 17 Aserrín de pino (arriba) y rastrojo de frutillas (abajo), antes y después de tamizar.	53
Figura 18. Carbón vegetal, producto de la gasificación	56
Figura 19. Gráficas de residuos para la validación de supuestos del análisis de varianza del carbón vegetal en el modelo de regresión lineal.....	60
Figura 20. Efectos principales en el ANOVA para carbón vegetal.....	61
Figura 21. Interacción de efectos del ANOVA para el carbón vegetal	62
Figura 22. Gráficas de residuos para la validación de supuestos del análisis de varianza del metano en el modelo de regresión lineal.	64
Figura 23. Efectos principales del ANOVA para metano.	65
Figura 24 Interacción de efectos del ANOVA para el metano.....	66
Figura 25 Pellets obtenidos para mezclas de aserrín de pino y carbón vegetal de aserrín de pino	69
Figura 26. Pellets obtenidos para rastrojo de frutillas y carbón vegetal de rastrojo de frutillas.	70
Figura 27. Curva TGA para el aserrín de pino (Toledo, 2014)	79
Figura 28. Cromatógrafo de la prueba piloto para Aserrín a 280°C con catalizador. Identificación de compuestos gaseosos en la gasificación.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de biomasa residual agrícola y forestal. (Nogués y Galindo, 2010)	23
Tabla 2. Fuentes de residuos biomásicos en las industrias agroforestales (Nogués y Galindo, 2010).....	24
Tabla 3. Tipos de Biocombustibles (Salinas y Gasca, 2009)	30
Tabla 4. Características físico-químicas y energéticas relevantes de los biocombustibles sólidos. (Nogués y Galindo, 2010)	33
Tabla 5. Procesos de conversión de la biomasa (Salinas y Gasca, 2009).....	35
Tabla 6. Reacciones ocurridas en la gasificación	38
Tabla 7. Matriz de Experimentos para el análisis del efecto conjunto de la temperatura y el catalizador en la obtención de metano y carbón vegetal	45
Tabla 8. Tabla del análisis de varianza del modelo de 3 factores con efectos fijos (Montgomery & Runger, 2003).....	46
Tabla 9. Cálculos para el ANOVA de 3 factores. (Montgomery & Runger, 2003).....	47
Tabla 10. Planeación de las mezclas para producción de pellets.	50
Tabla 11. Variación de Biochar-Aserrín-Humedad para mezcla óptima de peletizado de la muestra A1.....	51
Tabla 12. Humedad en base húmeda del aserrín de pino y rastrojo de frutillas.....	52
Tabla 13. Análisis elemental de las materias primas, aserrín de pino y rastrojo de frutillas.....	53
Tabla 14. Carbón vegetal y emisiones de metano, productos de la gasificación.	55
Tabla 15. Porcentaje en peso del carbono en las materias primas.....	56
Tabla 16. Diseño Factorial para análisis del efecto de las variables de supuesta importancia en la producción de metano y carbón vegetal.	57
Tabla 17. ANOVA para la producción del carbón vegetal (g).....	58
Tabla 18. Análisis de Varianza (ANOVA) para las emisiones de metano (g).	63

Tabla 19. Resumen de los modelos estadísticos para las emisiones de metano y carbón vegetal.	67
Tabla 20. Mezclas óptimas para peletizado de aserrín de pino-carbón vegetal de aserrín de pino y tamaño de pellet obtenido.....	68
Tabla 21. Mezclas óptimas para peletizado de rastrojo de frutillas-carbón vegetal de rastrojo de frutillas y tamaño de pellet obtenido.....	70
Tabla 22. Emisiones de compuestos medidos en el cromatógrafo y LEMS	81
Tabla 23 Humedad en base húmeda del aserrín de pino.	82
Tabla 24 Humedad en base húmeda para rastrojo de frutillas.....	82

RESUMEN

OBTENCIÓN DE METANO Y PELLETS DE CARBÓN VEGETAL A BASE DE ASERRÍN DE PINO Y RASTROJO DE FRUTILLAS: RENDIMIENTOS Y POTENCIAL ENERGÉTICO

Innovar en el aprovechamiento de energías renovables es uno de los retos actuales que enfrenta el mundo. Históricamente, la biomasa ha sido un bioenergético clave para satisfacer necesidades básicas de la humanidad, inicialmente en procesos de combustión para generación de energía térmica y recientemente usada en procesos de gasificación, que además ha recobrado importancia ante el agotamiento de combustibles fósiles. En el proceso de pirolisis se tienen diversos productos energéticos, los cuáles son una alternativa para la producción de biocombustibles como el gas obtenido, rico en metano, hidrógeno y monóxido de carbono, y el residuo sólido que es carbón vegetal, llamado biochar, cuyo principal uso se ha enfocado al remedio de suelos, pero también ha tenido aplicaciones como combustible.

En esta tesis se aprovechó la biomasa que proviene de residuos lignocelulósicos específicamente, el aserrín de pino y rastrojo de frutillas, mediante su gasificación para obtener CH_4 como producto principal en el gas y carbón vegetal (biochar) como producto sólido. Se realizó un ANOVA utilizando la herramienta estadística MINITAB para observar el efecto que tiene la temperatura en dos niveles de 280°C y 310°C , el usar o no catalizador y las materias primas de aserrín de pino y rastrojo de frutillas en la cantidad de carbón vegetal y metano producido. Por último, se buscó una mezcla óptima para elaborar pellets a base de carbón vegetal-aserrín de pino y carbón vegetal-rastrojo de frutillas utilizando como aglutinante el agua.

Como resultados se obtuvo que la producción de biochar es más factible que la del metano debido a que éste último se obtiene en muy pequeñas proporciones en los productos gaseosos (1.5%), además el modelo de regresión lineal para el metano no tiene una predicción de valores confiable, 15% y un ajuste del 62%. El biochar obtenido en promedio representa arriba del 70% de la masa que entró al reactor de pirólisis, para este caso el modelo del análisis

de varianza cumple con todos los supuestos para su validación, teniendo un ajuste a los datos del 94% y una predicción del 87%, en el cual se comprobó que todos los efectos son significativos estadísticamente. El valor máximo de la emisión de metano se obtuvo a la temperatura de 310°C, con catalizador y con aserrín de pino. Mientras que, para el biochar, su máximo se halló a 280°C, sin catalizador y utilizando como materia prima rastrojo de frutillas.

Las mezclas óptimas para peletizado de carbón vegetal-materia prima son del 60% carbón vegetal-40% materia prima, con una humedad agregada del 40% cuando la materia prima es aserrín de pino, y esta humedad representa el 55% para rastrojo de frutillas, siendo los pellets de carbón vegetal-aserrín de pino los que alcanzaron mayor longitud (17 mm) y mejor resistencia mecánica.

Palabras clave: Metano, Pellets, Carbón Vegetal, Biochar, Gasificación.

ABSTRACT

PRODUCTION OF METHANE AND CHARCOAL PELLETS FROM PINE SAWDUST AND STRAWBERRY STUBBLE: YIELDS AND ENERGY POTENTIAL

Innovating in the use of renewable energies is one of the current challenges facing the world. Historically, biomass has been a critical bioenergy source to satisfy the basic needs of humanity, initially in combustion processes for thermal energy generation and recently used in gasification processes, and it has also regained importance due to the depletion of fossil fuels. In the pyrolysis process, there are various energy products, which are an alternative for the production of biofuels, such as the obtained gas that is rich in methane, hydrogen and carbon monoxide, and the solid residue of charcoal (biochar) that is mainly used in soil remediation but also applications as fuel.

In this thesis, the biomass that comes from lignocellulosic residues, specifically pine sawdust and strawberry stubble, was used by gasification to obtain methane as the main product in the gas and biochar as the solid product. An analysis of variance, ANOVA, was performed using the MINITAB statistical tool to observe the effect of temperature at two levels of 280°C and 310°C, the use or not of the catalyst, and the raw materials of pine sawdust and strawberry stubble on the amount of charcoal and methane produced. Finally, an optimal mixture was sought to produce pellets based on charcoal-pine sawdust and charcoal-strawberry stubble using water as a binder.

The results showed that the production of biochar is more feasible than that of methane because the latter is obtained in tiny proportions in the gaseous products (1.5%), and the linear regression model for methane does not have a reliable prediction value of 15% and an adjustment of 62%. The biochar obtained, on average, represents over 70% of the mass that entered the pyrolysis reactor. For this case, the analysis of the variance model meets all assumptions for validation, having a fit to the data of 94% and a prediction of 87%, in which it was found that all effects are statistically significant. The maximum value of methane emission

was obtained at a temperature of 310°C, with catalyst and pine sawdust. While, for biochar, the maximum value was found at 280°C, without catalyst and using strawberry stubble as raw material.

The optimum mixtures for charcoal-raw material pelletizing are 60% charcoal-40% raw material, with an added humidity of 40% when the raw material is pine sawdust, and this humidity represents 55% for strawberry stubble, with the charcoal-pine sawdust pellets reaching the greatest length (17 mm) and the best mechanical resistance.

Key words: Methane, Pellets, Charcoal, Biochar, Gasification.

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento del fuego, la energía se ha convertido en un elemento indispensable para satisfacer las necesidades cotidianas de la humanidad, en la mayor parte de la historia la principal fuente de energía ha sido la biomasa, mostrando un desplazamiento a partir de la revolución industrial por los combustibles fósiles que trajeron consigo un cambio en las tecnologías de producción.

Además del desarrollo productivo que implicó el uso de estos combustibles de carácter no renovable, también se generó un impacto ambiental negativo, debido a que su combustión produce gases de efecto invernadero (GEI). No fue sino hasta mediados del siglo XX que se aceptó el cambio climático debido a la actividad humana y comenzó a hacerse consciencia en el mundo. Sin embargo, lejos de mejorar, la situación ha empeorado; la Organización Meteorológica Mundial (WMO) en su boletín sobre los gases de efecto invernadero (2019) mostró como las concentraciones de los gases de efecto invernadero una vez más rompieron récords: el dióxido de carbono (CO_2) aumentó un 147%, el metano (CH_4) un 259%, y el óxido nitroso (N_2O) un 123%, respecto al nivel preindustrial.

Con el agotamiento de los combustibles fósiles, además de las medidas tomadas desde finales del milenio debidas a la contaminación, el interés en la biomasa como fuente de energía ha cobrado fuerza. En el 2015, el PNUD propone 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que buscan poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030, donde la transición energética hacia fuentes de energías limpias, es decir, renovables, es considerada un paso clave para la mitigación del cambio climático. En el objetivo de desarrollo sostenible #7, “Energía asequible no contaminante”, propone apoyar nuevas iniciativas económicas y laborales que aseguren el acceso universal a los servicios de energía modernos, mejoren el rendimiento energético y aumenten el uso de fuentes renovables

para crear comunidades más sostenibles e inclusivas para la resiliencia ante los problemas ambientales que nos aquejan.

La EIA (2019) realizó una proyección del uso de diferentes fuentes de energía para consumo primario hacia el 2050 (Figura 1) donde visibiliza como ganó terreno la energía proveniente de recursos renovables desde hace unos años, apuntando hacia un aumento en el consumo de energía de este tipo, lo cual mejoraría el panorama de la situación ambiental que se enfrenta. Datos que reiteran lo anterior es que, en 2015, el 17.5% del consumo final de energía fue de energías renovables (PNUD, 2015).

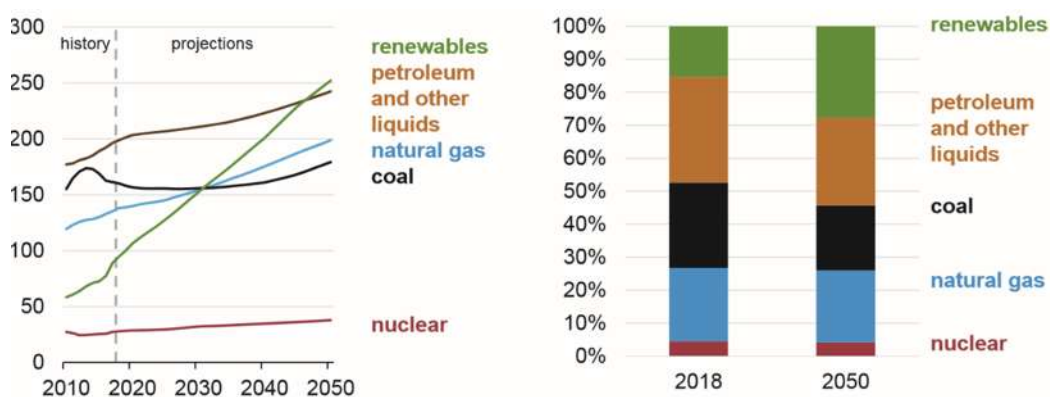


Figura 1. Consumo de energía primaria por fuente de energía en el mundo.
Fuente: IEA (2019), *International Energy Outlook 2019*

Hay que tomar en cuenta que la situación mundial de la demanda de energía exige un esfuerzo en la investigación e innovación en tecnologías para satisfacer las necesidades en los diferentes casos para países desarrollados y subdesarrollados, donde es congruente apostar por energías limpias.

Durante el 2018, en México, datos de la SENER registraron que el consumo de energía superó el 29.8% a la producción de energía primaria, y al cierre de ese año, presentó un índice de independencia energética equivalente a 0.70. Este índice es utilizado internacionalmente para medir el grado en que un país puede cubrir su consumo de energía derivado de la producción, si este es mayor a uno, quiere decir que es independiente energéticamente.

México muestra una dependencia por la importación de combustibles desde el 2014 (Figura 2) y se espera que incremente con el tiempo debido a que alcanzó el pico de la

explotación de petróleo (energía primaria principal en el país) y los consumos energéticos anuales incrementan cada año (Ferrari L., 2020).

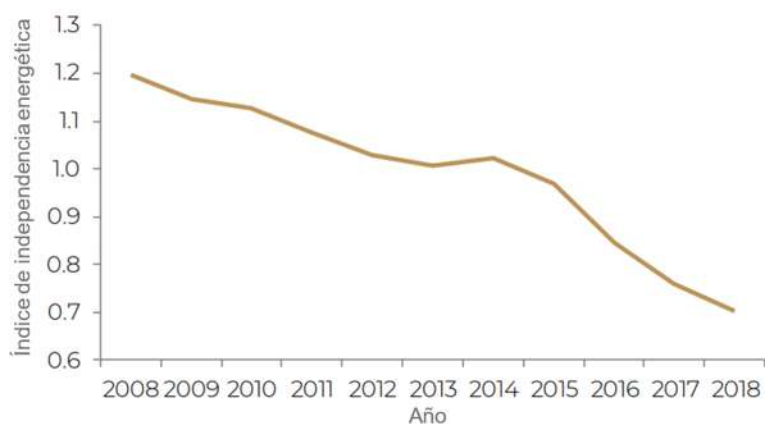


Figura 2. Índice de independencia energética
Fuente: Sistema de Información energética, SENER

Ante la crítica situación actual, la SENER ha buscado fortalecer la operación de los Centros Mexicanos de Innovación de Energía (CEMIE), entre ellos se encuentra el CEMIE en Bioenergía (CEMIE-Bio) conformado por el Clúster de Biocombustibles Sólidos (CBS). Se sabe que la bioenergía (principalmente biomasa sólida) actualmente es la fuente más importante de energía renovable en México con un 10% del consumo de energía final (BCS, 2019). También se ha desarrollado un marco jurídico para el fomento y uso de energías renovables en el sector energético, con normas como “Ley de Transición Energética” y la “Ley General de Cambio Climático”.

Datos reportados por la SENER (PRODESEN, 2018) prevén que, entre el 2018 y 2032, se adicionen 30,241 MW de capacidad de generación en tecnologías renovables, de los cuales el porcentaje por energía renovable se halla expresado en la Figura 3.

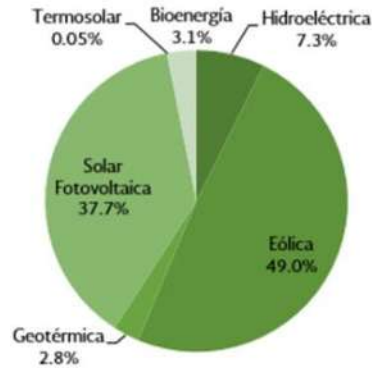


Figura 3. Participación de las tecnologías renovables en las adiciones de capacidad 2018-2032

Fuente: Sistema de Información energética, SENER

El colapso de grandes complejos petroleros a nivel mundial, como Cantarell en la sonda Campeche, así como el fenómeno del aumento de precio de los hidrocarburos hace manifiesta la necesidad de la transición energética a energías renovables (Ferrari L., 2020). Sin embargo, hay que considerar que éstas no podrán cubrir las demandas actuales de energía en el mundo, por lo que debe existir, además, un cambio de hábitos de consumo para satisfacer las necesidades energéticas básicas.

Es conveniente explorar más caminos en el terreno de la energía renovable y brindarles una oportunidad a nuevos métodos para su obtención. Un procedimiento para obtener energías limpias que ha sido considerado en la última década y en el que continúan las investigaciones es la gasificación de residuos lignocelulósicos provenientes de la industria agrícola y forestal. Si se logra aprovechar el abundante potencial de los recursos renovables podría reducirse de forma sustancial la dependencia de las fuentes fósiles, alcanzar las metas comprometidas en materia de reducción de emisiones nacionales e internacionales y generar una transición energética sólida y eficiente que satisfaga la creciente demanda del sector (Angles, 2017). Hace falta investigación sobre el uso de residuos biomásicos y éstos pueden ser una alternativa para la producción de biocombustibles sólidos y gaseosos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Obtener metano y carbón vegetal a base de residuos de aserrín de pino y rastrojo de frutillas, peletizando el carbón vegetal resultante del proceso, para posteriormente evaluar el rendimiento de ambos biocombustibles.

1.2.2 Objetivos particulares

- i. Caracterización de las materias primas de aserrín de pino y rastrojo de frutillas: tamaño de partícula y humedad.
- ii. Establecer los parámetros óptimos de funcionamiento del reactor gasificador: temperatura, presión y carga del reactor.
- iii. Estudiar el efecto del uso del catalizador, la temperatura y la materia prima sobre el contenido del metano y carbón vegetal en el producto a través de un análisis de varianza de los datos arrojados de la experimentación.
- iv. Evaluar los rendimientos de la producción de metano y carbón vegetal.
- v. Elaboración de pellets con mezclas de carbón vegetal-aserrín y carbón vegetal-rastrojo de frutillas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente existe una alta dependencia de los combustibles fósiles, 80% a nivel mundial y 90% en México (SENER, 2017), esto ha fomentado proyectos estratégicos para buscar la transición energética a fuentes renovables. Por otro lado, existen problemáticas ambientales debidas a la quema de estos combustibles fósiles que no tienen un ciclo de renovabilidad y por lo tanto generan gases de efecto invernadero que se acumulan en la atmósfera. Es por ello que este trabajo busca aprovechar residuos biomásicos, como el aserrín (que proviene de la industria maderera) y las podas del sector agroindustrial, que tiene grandes potenciales para generación de calor que no han sido explorados.

Los aserraderos, donde únicamente se utiliza el 72% del árbol (Toledo, 2014), queman el aserrío en combustiones incontroladas solo para deshacerse de él, sin poseer un mayor valor agregado o alcanzar una eficiencia energética mayor (Soto y Núñez, 2008), mismo caso para la poda. El presente estudio busca gasificar estos residuos obteniendo como producto un gas compuesto, entre otros gases, por metano, un biocombustible, además de un producto sólido secundario, el carbón vegetal o biochar, que se utiliza como carbón activado para mejorar y recuperar suelos que pueden tener mejores resultados que el uso de compostas típicas en las que se usa el aserrín, sin embargo, este trabajo explora su uso como combustible sólido, a través de su densificación para producir pellets. La producción metano y pellets de carbón vegetal podría ser utilizado en tecnologías ya desarrolladas como gasificadores y estufas de gas, lo que puede facilitar la adopción de estos biocombustibles. La diversidad energética para satisfacer necesidades térmicas en el sector residencial impulsará la disminución del uso de fuegos abiertos tradicionales en zonas rurales (3 mil millones de personas a nivel mundial, y aproximadamente 28 millones en México) que presentan eficiencias térmicas bajas y de combustión deficientes (Berrueta *et al*, 2008; Maserá *et al*, 2011; Ruiz-García *et al.*, 2018).

La importancia de esta investigación radica en aprovechar residuos biomásicos que actualmente son una problemática en la región, y que tienen un potencial para dar un valor agregado a este tipo de biomasa, lo que ayudará a alcanzar las metas de transición energética,

calidad del aire y cambio climático que son una necesidad mundial, como fue planteado recientemente en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2015) con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En esta investigación, se aporta para alcanzar los objetivos 3, 7 y 13 (“Salud y Bienestar”, “Energía asequible no contaminante” y “Acción por el clima”), al mismo tiempo que será un detonante para impulsar las economías locales al generar empleos principalmente en los sectores más vulnerables de país, donde precisamente se producen estos residuos. Además, los biocombustibles desarrollados en esta investigación tendrán aplicaciones térmicas en tecnologías ya existentes en el sector residencial rural, periurbano y urbano, para satisfacer tareas de cocción o calefacción. La investigación (aplicada) realizada contribuirá en aumentar la gama de soluciones energéticas en el sector residencial rural que es uno de los sectores más vulnerables del país.

Capítulo 2.

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Terra preta es el término que le acuñaron a unas tierras descubiertas en la cuenca Amazónica, a finales del siglo XIX. Autores como Smith en 1879 y Hartt en 1885 (Woods, 2004) las describieron como suelos fértiles y de color oscuro, de las cuales no pudieron precisar el origen. Falcao (2012) consideró que dichos suelos fueron desarrollados por los indios mediante depósito de materiales orgánicos, derivados de la quema de biomasa y restos de esqueletos de pescado, lo cual los transformaba en suelos fértiles al agregársele cierta riqueza de nutrientes (Escalante *et al*, 2015). A esa materia que ayudó a prosperar el suelo del Amazonas se le llama actualmente biochar o carbón vegetal. Aquí es donde se marca el inicio de manera rústica de la pirólisis, una de las etapas de la gasificación, y se cree que su uso en prácticas agrícolas data de hace más de dos mil años. La técnica que probablemente se ha utilizado desde hace siglos para añadirle esta materia negra (biochar) a las tierras y prepararlas para el cultivo, vigente hasta nuestros días, consta de un incendio para desmontar de árboles y plantas la zona donde se hará la siembra, en el caso de ser en un lugar donde se ha realizado con anterioridad el cultivo, se incendian los residuos de la cosecha, llamados rastrojo o poda.

Simultáneamente al redescubrimiento de las tierras amazónicas, en 1890, muchas ciudades de Estados Unidos se veían iluminadas con lámparas incandescentes, alimentadas de lo que le llamaban *town gas*, proveniente de una gasificación rudimentaria, esto es, el calentamiento de la materia prima, carbón, para este caso, en un medio con deficiencia de oxígeno (Valdés, O., 2005). El empleo de esta técnica tuvo su apogeo durante la segunda guerra mundial, debido a la escasez de petróleo en los motores de combustión interna, moviendo barcos, trenes y camiones, y usando como materia prima el carbón y la madera. Sin lugar a

dudas, el producto más valuado en aquel entonces de la gasificación era el gas combustible, compuesto por syngas o gas de síntesis, metano y otros hidrocarburos de cadena corta, pero, además de ello, esta técnica produce carbón vegetal y el líquido viscoso *tar*. Sin embargo, la gasificación se dejó de lado después de la segunda guerra mundial debido a los bajos costos que presentaba entonces el petróleo.

Debido a los problemas ambientales y la búsqueda de una transición energética hacia combustibles no fósiles, a finales de los 90's se retomó la investigación de la gasificación, utilizando como materias primas residuos de diversos orígenes y estudiando todos los productos obtenidos. El líquido aceitoso que se produce en la etapa de pirólisis se ha utilizado como combustible, incluso como ingrediente de algunos productos químicos (Kim *et al*, 2014). Por otro lado, el biochar se ha estudiado alrededor de todo el mundo como remediador de suelos, pero también se ha estudiado con fines energéticos. Yan *et al* (2015) estudió las propiedades pellets de biochar provenientes de aserrín de abeto chino, hallando que a 550°C se tienen altos poderes caloríficos, así como mejor compresión y resistencia a la rotura. En el 2018, Xianjun realizó una investigación con pellets de biochar obtenido a diversas temperaturas en el rango de 400-600°C, partiendo de residuos de paja de maíz, estudió sus características fisicoquímicas y concluyó que el poder calorífico de los pellets aumentó de manera proporcional con la temperatura a la que se obtuvo el biochar, además de que se pueden reducir los costos y los problemas asociados con el transporte y el almacenamiento de biomasa debido a su calidad estable, fuerte resistencia a la intemperie e idoneidad para el almacenamiento a largo plazo. Recientemente el biochar ha sido considerado como una prometedora tecnología de emisiones negativas y potencialmente puede ser usado para mitigar el cambio climático en poblaciones subdesarrolladas (Hansson, 2020).

Respecto al gas resultante del proceso, también se suman varias investigaciones, ya que este tiene un papel importante en diversos procesos, a saber, la obtención de metanol, amoníaco y líquidos Fischer-Tropsch, los cuales son combustibles. Por ejemplo, Pengmei (2004) estudió en China la gasificación de aserrín de pino con catalizadores como Dolomita y Níquel, observó que el gas que se obtiene, además del CO y H₂ (syngas), también contiene CH₄ y CO₂, sugiriendo modificaciones en el catalizador. Por otro lado, en su tesis de maestría, Toledo (2014), estudia el efecto del porcentaje de Níquel soportado en γ -Al₂O₃, y encuentra un rendimiento de la

relación CO/H₂ óptimo, agregando 10% en peso del metal. Utiliza, al igual que Pengmei, residuos lignocelulósicos provenientes del pino y construye su propio gasificador, el cual emplearé para la experimentación del presente trabajo.

Como se puede observar, la mayoría de investigaciones relacionadas con la gasificación provienen del oriente, sin embargo, es un terreno amplio que se ha estudiado poco en nuestro continente y promete resolver necesidades energéticas actuales.

2.2 BIOMASA

La biomasa representa toda materia orgánica que almacena energía proveniente de la luz solar mediante enlaces químicos entre moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno (McKendry, 2002). A nivel mundial se produce una gran cantidad de biomasa de distintos tipos, pensando en su procedencia y es el principal aporte en cuanto a energías renovables. Es ampliamente utilizada en todo el mundo, procesada con diferentes tratamientos, así como variadas tecnologías de uso final. Ejemplo de ello es la habitual práctica en los países europeos de aplicaciones para agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción, que son abastecidas con pellets. Si hablamos de países emergentes, la biomasa es utilizada con los mínimos tratamientos, es decir, como leña, el carbón vegetal, residuos agrícolas, entre otros, donde la cocción de alimentos es la principal actividad realizada.

2.2.1 Clasificación general

Existen diversas maneras para clasificar a la biomasa, algunos autores recurren a la clasificación por su origen:

Biomasa natural. Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana para su potenciamiento o modificación. Pueden ser leños, ramas, hojas y demás derivados de limpieza de los bosques.

Biomasa residual. Son todos los residuos, generados por la actividad humana que impliquen el uso de materia orgánica, incluidas las actividades forestal, agrícola y ganadera.

Algunos ejemplos para ilustrar son las aguas residuales, los afluentes ganaderos y las podas de cosechas.

Cultivos energéticos. En la década de los 70's, al atravesar la primera crisis energética, se empezó a considerar la posibilidad de producir energía por el sector agrícola, mediante ciertos cultivos específicos (Nogués y Galindo, 2010). En esta categoría están incluidos todos los cultivos sin fines alimentarios destinados a la producción de energía, donde se seleccionan para esta actividad los de mayor robustez, es decir, aquellos que tengan una resistencia ante sequías, enfermedades y características del suelo, para de esta manera obtener una biomasa rentable. La gama de estos cultivos energéticos abarca desde cultivos habituales como el cereal, hasta algunos poco convencionales como patata, sorgo dulce, colza.

2.2.2 Biomasa agroforestal

La biomasa residual puede ser de procedencia urbana, industrial, ganadera, agrícola o forestal. Enfocaremos la atención a estas últimas dos procedencias.

Las actividades agrícolas y forestales tienen en común que las principales materias con las que trabajan están compuestas en su mayoría de lignina, algunas hemicelulosas y la celulosa: el material orgánico más abundante en el mundo. Debido a esto se les atañe el término de biomasa lignocelulósica.

La biomasa agroforestal proviene de los bosques y cultivos, y la humanidad la ha utilizado para diversos fines: en sus inicios como combustible, en la construcción y hasta para fines alimenticios. Empero, su empleo ha evolucionado hasta hoy en día usarse en la obtención de diversos productos químicos como tintas, papel o medicamentos, en la fabricación de herramientas, muebles y demás artículos. Este abanico de producción trae consigo la generación de residuos, los cuales van desde ramas, podas, follajes, cortezas, recortes y hasta aserrín (Tabla 1).

Tabla 1. Fuentes de biomasa residual agrícola y forestal. (Nogués y Galindo, 2010)

Categoría	Actividad que lo produce	Tipos	Residuos que genera	
Forestal	Tratamientos selvícolas:	Tratamientos realizados en montes cuyo principal fin es la obtención de madera; de pinares, hayedos, robledales.	-Árboles de pequeñas dimensiones ($D_n < 7$) sin interés comercial.	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Preclareo ▪ Podas ▪ Aperturas de caminos 		-Ramas de poda	
				-Biomasa del estrato arbustivo y de especies arbóreas secundarias
	Aprovechamientos forestales:		Las claras realizadas en montes madereros.	-Copas, pies delgados, secos o sin interés, troncos pegados a la raíz.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aclareo ▪ Cortas finales 		Cortes finales en los montes arbolados.	
	Incendios	Principalmente en pinares	Árboles quemados sin interés comercial	
	Cosecha de matorrales	Especies invasoras heliófilas de las familias: leguminosas ericáceas, cistáceas, etc.	Biomasa de la parte aérea de la planta	
Agrícola	Cosecha de herbáceas	Cereales, oleaginosas, algodón.	Paja, olotes, bagazo.	
	Poda de leñosas	Frutales, olivo, vid	Ramas, pies secos, troncos pequeños.	

La parte que sigue en la línea de aprovechamiento de recursos agroforestales, después de su recolección, continúa en las industrias maderera y agraria, principalmente, donde la generación de residuos en éstas se suma a la cantidad inicial.

Tabla 2. Fuentes de residuos biomásicos en las industrias agroforestales (Nogués y Galindo, 2010)

Categoría	Actividad que los produce	Tipos	Residuos que genera
Industria agraria	Industrias extractivas, industrias preparadoras.	<ul style="list-style-type: none"> • Extractivas del aceite, café, vinícolas. • Preparación de arroz, cereales, frutos secos, etc. 	Cascarillas, cáscaras, zumos, orujos, pellejos.
Industria de la madera y productos forestales	Primera transformación y segundas transformaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Aserrado mecánico • Preparación de tableros de partículas y fibras • Desenrollo, chapa • Celulosas corcheras 	Cortezas, aserrines, virutas, polvos de lijado, recortes de chapa.
	Segunda y posteriores transformaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Carpintería • Muebles • Embalajes de madera • Papel • Derivados del corcho 	Recortes, viruta, aserrín del polvo de lijado, recortes de corcho.

Los usos que llegan a tener estos subproductos se determinan por la naturaleza del residuo, las prácticas tradicionales de la región, la disponibilidad de recurso económico y el conocimiento del entorno de quienes trabajen estos materiales (Marques, 2010). Por ejemplo, es bien sabido que, con fines alimenticios, en la ganadería se utiliza cierta parte de los residuos de la actividad agrícola; también es el caso de los residuos de la industria de productos forestales, donde al aserrín le dan usos que van desde conglomerados para tableros hasta camas para animales. Sin embargo, esto no es suficiente para disolver el problema del cúmulo de residuos que incrementa con el paso del tiempo.

Varios factores, como la falta de conciencia ambiental, carencia económica y de tecnología para el manejo de los residuos por parte de las personas que manipulan estos materiales, ha generado la acumulación de tales residuos, teniendo, además, dentro de sus posibles fines, la quema clandestina, en el caso de los residuos forestales, o el abandono a cielo abierto de subproductos agrícolas. Ambas posibilidades recaen en problemas de índole tanto ambiental como social, por ejemplo, las emisiones que generan al ser quemados, o incluso el

mal aspecto o la atracción de fauna nociva como roedores y cucarachas, son solo algunas de las preocupaciones con respecto a la mala disposición de residuos. Por lo tanto, es necesario investigar y desarrollar tecnología aplicable para darle un propósito sostenible a esta biomasa.

Residuos del cultivo de frutillas

Dentro de los problemas que existen en la región de Michoacán con respecto a los residuos lignocelulósicos encontramos la poda de las llamadas berries o frutillas, las cuales incluyen a las fresas, frambuesas, zarzamoras y moras azules y se caracterizan por su tamaño pequeño y color brillante.

Durante los últimos años la producción, consumo y exportación de las frutillas ha crecido, viendo como oportunidad de mercado a los consumidores de ingresos medios y altos, dado que éstos aprecian los productos que fomentan el cuidado de la salud, y que existen hallazgos que relacionan el consumo de las berries con el combate de distintos tipos de enfermedades, para muestra de ello, en el 2018, de las 21 millones 147 mil hectáreas agrícolas sembradas y las 262 millones 138 mil toneladas cosechadas, la siembra de frutillas alcanzó el 0.18%, con un porcentaje en el valor de la producción del 4.91% (SIAP, 2018).

Según la SIAP (2018), de 21 estados que producen berries, el volumen de producción es cubierto 96.8% por Michoacán, Jalisco, Baja California y Guanajuato, aportando 97.3% del valor de la producción.

Michoacán es el principal productor y exportador a nivel nacional de frutillas, más específicamente de zarzamora y de fresa, lo cual representa una gran compromiso y responsabilidad con la producción, lo que implica atender los distintos problemas ambientales que esto atañe, tales como el uso de suelo, manejo de agua y residuos de los cultivos. Es bien sabido que los residuos de la poda de cualquier siembra, son quemados a cielo abierto, lo que genera contaminación, motivo que convierte en un menester el tratamiento y adecuado encauce de dichos residuos para disminuir el impacto ambiental que causan.

Residuos de la producción forestal

México cuenta con una superficie de 137.8 millones de hectáreas (ha) cubiertas por algún tipo de vegetación forestal. De éstas, 65.7 millones de ha (47.7%) corresponden a superficie arbolada por bosques, selvas, manglares y otras asociaciones vegetales; 56.3 millones de hectáreas (40.8%) están cubiertas de matorral xerófilo, es decir, vegetación de zonas áridas y semiáridas; y otras áreas forestales cubren 15.8 millones de ha (11.5%) (CONAFOR, 2019).

La SEMARNAT (2016) declaró que la producción forestal maderable para el 2016 en metros cúbicos rollo (m^3r) alcanzó los 6.7 millones donde principales estados productores en 2016 fueron: Durango (35.1%), Chihuahua (13.2%), Veracruz (7.8%), Michoacán (6.9%) y Oaxaca (5.9%) que contribuyeron con el 68.6% de la producción total, equivalente a 4.6 millones de $m^3 r$. (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

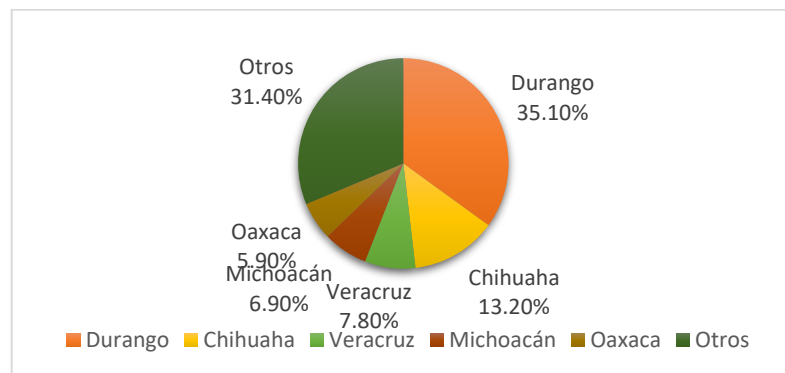


Figura 4. Producción forestal maderable nacional por volumen en porcentaje.
SEMARNAT, 2016

Pese a la gran diversidad de árboles, es destacable el porcentaje de pinos que participan en la producción forestal, seguido por el encino. Estas dos especies contribuyen un 86.1% en los casi 7 millones de m^3r de volumen. El otro 13.9% está conformada por oyamel, maderas preciosas, comunes tropicales y otras latifoliadas y coníferas.

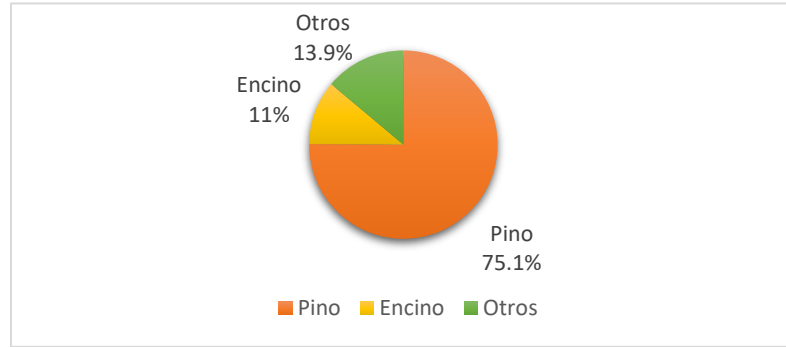


Figura 5. Contribución de especies al volumen de producción maderable. SEMARNAT, 2016

El destino de los maderables es variado y el grupo de productos que el anuario estadístico de la producción forestal (SEMARNAT, 2016) reporta es la escuadría con el mayor porcentaje, seguido por los celulósicos, posterior los durmientes, los demás productos, chapa y triplay, postes pilotes y morillos, leña y carbón constituyen el menor porcentaje.

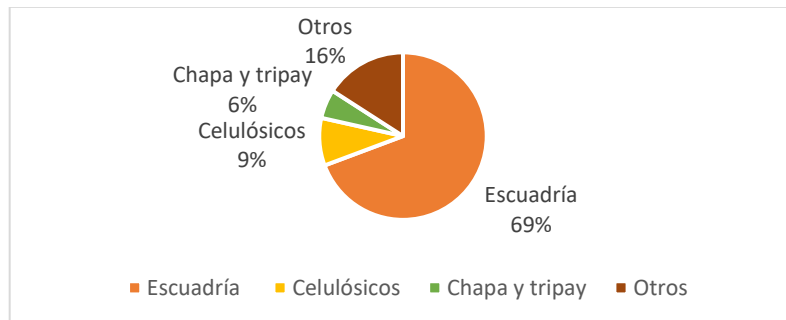


Figura 6. Destino de la producción forestal por producto. SEMARNAT, 2016

En el 2016 (SEMARNAT) se destinaron 4.7 millones de m^3 de la producción forestal para la escuadría, que es la madera en rollo designada para producir tablas y tablonés, vigas, material de empaque y cuadrado para herramientas. La madera en rollo son troncos de árboles derribados o seccionados, con un diámetro mayor a diez centímetros en cualquiera de sus extremos, sin incluir la corteza. Desde este punto se comienzan a vislumbrar el gran porcentaje de residuos que genera la industria maderera que crece de manera exponencial al momento de añadirle el desperdicio en las pequeñas madererías debido a los cortes realizados en las adecuaciones para la elaboración de múltiples artículos. Si consideramos que únicamente se utiliza el 72% del árbol (Toledo, 2014), estamos hablando de un volumen de residuos de más de 1 millón de m^3 , donde gran proporción de estos subproductos es aserrín.

2.2.3 Bioenergía

La energía obtenida de la biomasa es llamada bioenergía y esta procede en última instancia de la energía solar (motivo por el cual tiene carácter renovable) que se fija en las plantas a través de la fotosíntesis, y la energía se libera al romper el enlace covalente del carbono a través de la combustión, dando como resultados principales dióxido de carbono (CO_2) y agua.

La biomasa es considerada una fuente de energía limpia, ya que, al momento de la combustión, la cantidad de CO_2 que se genera es la misma que la que en un inicio se toma del ambiente para el crecimiento de la planta. Mckendry (2002) opina que es necesario replantar la biomasa cosechada a corto plazo, lo que asegura que el CO_2 sea absorbido y devuelto para un ciclo de nuevo crecimiento. Esto es conocido como el ciclo del carbono. (Figura 7)

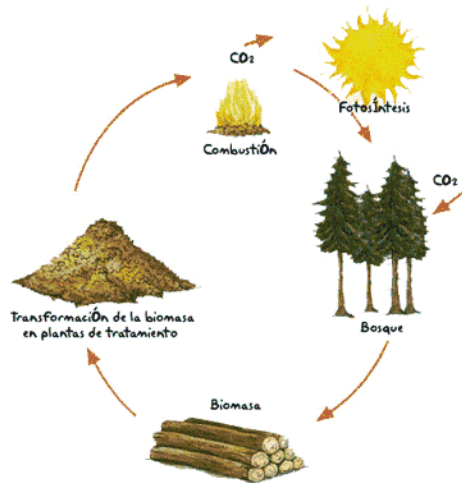


Figura 7. Ciclo del carbono en la biomasa

Lo que hace prometedor el aprovechamiento energético de la biomasa como combustible es el auge que se observa en el desarrollo de tecnologías para su aplicación de manera eficiente. Otro factor importante es que la producción de biomasa es económica en comparación del costo de extracción de los combustibles fósiles, y que en ocasiones son residuos como en este caso, es decir, no tienen costo como materia prima para su conversión, por lo que se elucida un panorama rentable como fuente de energía.

2.3 BIOCOMBUSTIBLES

Todos los carburantes que se obtienen a partir de la biomasa son llamados biocombustibles. La biomasa lignocelulósica puede tener combustión directa en hornos, como es común en las zonas rurales con rastrojos y leña, para satisfacer demanda de combustible para cocinar o generar calefacción en pequeña escala, (biocombustibles primarios), pero a través de tratamientos físicos y químicos puede manipularse (biocombustibles secundarios) para obtener biocombustibles ya sean líquidos, gaseosos o sólidos adecuados para emplearse en diferentes fines, como energía térmica residencial, transporte o procesos industriales en gran escala. Atendiendo al estado en el que se hallan los biocombustibles, identificamos 3 tipos, como se puede ver en la tabla 3.

Los biocombustibles han tenido una constante evolución, fundamentada principalmente en el tipo de materia prima que se utiliza para su producción, señala Ríos *et al* (2017). Se reconocen cuatro generaciones de biocombustibles actualmente. Los biocombustibles de primera generación son aquellos provenientes de la biomasa, especialmente de cultivos agrícolas, destinada a la alimentación humana. Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación son producidos a partir de materias primas que no son fuentes alimenticias, o bien son desechos agroindustriales. Los biocombustibles de tercera generación proceden de la biomasa obtenida de especies no comestibles, tales como las microalgas. Finalmente, los biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de bacterias genéticamente modificadas; en este caso se emplea CO₂ o alguna otra fuente de carbono para la obtención del producto (Salinas y Gasca, 2009).

Tabla 3. Tipos de Biocombustibles (Salinas y Gasca, 2009)

BIOCOMBUSTIBLES		
Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogás (metano)
Astillas	Aceites vegetales	Hidrógeno
Briquetas y pellets	Ésteres derivados de aceites	
Triturados finos	vegetales	
Carbón vegetal	Aceites de pirólisis	

2.3.1 Biocombustibles líquidos

En la última década, los biocombustibles líquidos han tenido auge, basta decir que en el 2015 la producción mundial de biodiésel alcanzó 7 952 millones de galones (26.8 millones de toneladas). A continuación, se da un repaso a los biocombustibles líquidos más utilizados (Salinas y Gasca, 2009).

Bioalcoholes. Son alcoholes de origen orgánico. Están formados por dos tipos fundamentales: el etanol y el metanol. El etanol presenta mejores expectativas en lo que se refiere a la utilización, al primero se le conoce como bioetanol. La materia prima es muy variada: cereales (maíz, trigo y cebada), tubérculos (yuca, camote, patata y malanga), celulosa (madera y residuos agrícolas), y sacarosa (remolacha, caña de azúcar, melaza y sorgo dulce). Estos compuestos energéticos se transforman en azúcares, y a continuación se convierten en etanol por medio de la fermentación alcohólica. Se emplea en mezclas con gasolina convencional para sustituirla como carburante en mayores o en menores proporciones; no sustituye totalmente a la gasolina, ya que ésta le da a la mezcla estabilidad y resta volatilidad, lo que facilita su uso cotidiano, su almacenamiento y su transporte.

Bioaceites. Se obtienen de las oleaginosas y de aceites vegetales fritos (aceite de cocina). Se han hecho pruebas convencionales para echar andar motores con aceites de supermercado, y

han sido exitosas. Cabe mencionar que el aceite vegetal no libera contaminantes como el dióxido de azufre.

Biodiesel. Es un combustible líquido que se obtiene de manera similar a los bioalcoholes, pero en este caso se sustituye parte del diésel por diversos aceites vegetales y cultivos oleaginosos provenientes de la soja, la colza, la palma y el girasol. Aunque estas especies suelen ser las más utilizadas en su producción, se puede obtener a partir de más de 300 especies vegetales, dependiendo de cuál sea la que más abunde en el país de origen.

2.3.2 Biocombustibles gaseosos

En esta categoría la mayoría de los biocombustibles son obtenidos en forma biológica a partir de la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno, generalmente, por bacterias, tal es el caso del *biogás*, que es el más conocido dentro del ramo. Éste se produce en depósitos cilíndricos con agitación que aseguran la degradación anaeróbica, llamados biodigestores. También existe el *biometano*, que es el resultado de una depuración del biogás, el cuál es sometido a procedimientos biotecnológicos para reducir en su composición la proporción del dióxido de carbono e incrementar la del metano por arriba del 96%. El metano como combustible gaseoso tiene muchas ventajas en varios ámbitos. A continuación, se hace una descripción más detallada acerca de este gas.

Metano

El metano es el hidrocarburo saturado de cadena más corta, que se presenta como gas a condiciones normales de temperatura y presión, es uno de los principales GEI, contaminando más que el CO₂, cuando es liberado a la atmósfera. Sin embargo, su combustión produce más energía calorífica por masa que cualquier otro hidrocarburo o combustible fósil con un calor de combustión de 802 kJ/mol, en distintos países se utiliza como combustible para calefacción, transportándose a las casas por medio de tuberías, además se han desarrollado motores para automóviles que funcionan con el metano, llamado gas natural. Mientras tanto, en la industria química se parte de este gas para la obtención de hidrógeno, metanol, ácido acético y anhídrido acético.

Caracterización

Para la caracterización de este gas es común usar un método de separación como la cromatografía, que es utilizada como técnica analítica por su capacidad para analizar compuestos volátiles. Esta técnica consiste en inyectar una pequeña cantidad de la muestra a analizar en una corriente de gas inerte a altas temperaturas, que atraviesa después una columna cromatográfica que separará los componentes por medio de mecanismos de partición, de adsorción, o una mezcla de ambos. Los componentes emergen de la columna a distintos intervalos, para después pasar a través de un sistema de detección adecuado.

2.3.3 Biocombustibles sólidos

La REMBIO (Red Mexicana de Bioenergía) (2020) cataloga aquí a todos los combustibles sólidos que mediante la combustión directa o previa gasificación o pirólisis, generan calor y electricidad. Además, hace una recopilación de los más importantes: *la leña* (para uso residencial), que proviene normalmente de árboles y arbustos localizados tanto en bosques naturales como en áreas agrícolas aledañas a los poblados, cuyos usos finales más difundidos dentro del sector residencial son la cocción, la calefacción y el calentamiento de agua. El *carbón vegetal* se produce con madera proveniente de varias fuentes, mediante procesos de pirólisis y gasificación, alrededor del 20% del peso original de la madera se convierte en carbón vegetal, mientras que el resto de la masa es liberada en forma de vapor y gases; así el carbón vegetal tiene alrededor del doble del contenido energético y sólo una cuarta parte del peso de la madera original, lo que hace más fácil su transporte y almacenaje. Los pellets y briquetas también forman parte en esta clasificación. En el siguiente apartado se extiende la información acerca de ellos.

Pellets y Briquetas

Son biocombustibles densificados, elaborados principalmente a partir de aserrín y en la actualidad se está expandiendo el uso de residuos agroindustriales como materia prima. La elaboración incluye, de manera resumida, los siguientes procesos: secado, reducción de tamaño y densificado. Con esto se aumenta su rendimiento energético, además se facilita su almacenamiento y manejo y se hace viable su transporte a muy largas distancias (incluso transcontinentales). El crecimiento del mercado mundial de biocombustibles sólidos procesados

ha llevado a los fabricantes de equipos de molienda, secado y densificado a ofrecer equipos y plantas completas, con capacidades desde 0.1 hasta 50 t/h, que son aptos para las más diversas escalas de producción y materias primas.

Cuando se trata de valorar el rendimiento energético, ya sea en la biomasa o en la conversión a combustible sólido, hay ciertas propiedades que pueden servir de guía, las cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Características físico-químicas y energéticas relevantes de los biocombustibles sólidos. (Nogués y Galindo, 2010)

Características	Propiedades a evaluar	Razón de evaluarse
Físicas	Densidad	Influyen en la selección y diseño de equipo del manejo de la materia prima y necesidad de pretratamiento.
	Humedad	
	Distribución granulométrica	
Químicas	Análisis elemental	Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica.
	Análisis próximo	
	Componentes estructurales	
	Composición de cenizas	
Energéticas	Poder calorífico	Determina la cantidad de energía aprovechable.

La evaluación del potencial en los biocombustibles sólidos, ya sea sin tratamientos o sometidos a alguna técnica, es amplia. En las siguientes secciones se observan a detalle los pretratamientos que se deben de realizar.

Pretratamientos

El uso de manera directa de la biomasa limita las aplicaciones que puede tener por algunas características físicas no inherentes que posee, como lo son su humedad, tamaño y granulometría muy variable y la presencia de productos no deseados como arena, piedras o algún metal. Es por

ello que se suelen aplicar tratamientos encaminados a adecuar las propiedades físicas de la biomasa para su empleo, como los que se describen a continuación.

Humedad

La humedad de cualquier biomasa, en este caso, la agroforestal, está en función de factores como la especie, el momento de la recolección, el clima, la estación, y estos valores van del 20 al 60% en contenido de humedad. Cuando se piensa en utilizar como fuente de energía, un valor del 10 al 20% es apropiado, ya que a valores altos de humedad la temperatura de la flama de combustión disminuye y se da una combustión de manera incompleta. Para la reducción de humedad es común en las comunidades rurales, posterior a la recolección, exponer al sol la biomasa, aunque esto no garantiza cierto porcentaje de humedad es una técnica que ha funcionado, de manera industrial se utilizan habitaciones con aire caliente deshumidificado para secado de tableros y a escala laboratorio se utilizan estufas de secado.

Reducción de tamaño de partícula

El tamaño de partícula influye en el procesamiento que se le dará como biocombustible, para una degradación óptima. Nogués y Galindo (2011) hacen una disgregación de tamaños, en la que distinguen 3 tipos como los principales; el triturado, el astillado y la molienda, en orden de tamaño. En el triturado se pasan piezas grandes como troncos o ramas a trozos que pueden ser de longitud larga, pero con grosor de 1 a 2 cm. El siguiente tamaño en la jerarquía lo tiene el astillado donde el grosor es prácticamente el mismo, pero el tamaño longitudinal se disminuye a unos pocos centímetros. Finalmente, la molienda, que suele utilizarse para la producción de pellets o briquetas, incluso cuando el aprovechamiento lo requiera. En este trabajo, el grado de reducción necesario es el de molienda, dado que se requiere aprovechar en la medida de lo posible el espacio pequeño de procesamiento que tiene el gasificador a utilizar.

2.3.5 Procesos de conversión de la biomasa

A través de diversos procesos, la biomasa puede convertirse en un combustible sólido, líquido o gaseoso, lo cual nos habla de su versatilidad como fuente de energía. Cuando se aplican estos procesos de conversión (tabla 5) se adquieren productos con densidades altas y un valor energético mayor, transformando la biomasa en recursos energéticos secundarios aprovechables

en forma de biocombustibles; a partir de los cuales se puede producir energía en forma de calor, electricidad o fuerza motriz (Ríos, 2017). La elección del proceso de conversión, así como cualquier dificultad en el procesamiento queda dictada por las propiedades de la biomasa como el tipo y la cantidad, también influye la forma en que se requiere la energía y es la interacción entre estos dos aspectos lo que permite introducir la flexibilidad en el uso de la biomasa como fuente de energía (Mckendry, 2002). A continuación, se explican puntualmente los tratamientos que se utilizaron en este trabajo; mecánicos y termoquímicos

Tabla 5. Procesos de conversión de la biomasa (Salinas y Gasca, 2009)

Tratamientos	Técnicas	Productos	Aplicaciones
Mecánicos	Astillado	Leñas, astillas, briquetas, aserrín	Calefacción, electricidad.
	Trituración		
	Compactación		
Termoquímicos	Pirólisis	Carbón, aceites, gasógenos.	Calefacción, electricidad, transporte, industria química.
	Gasificación		
Bioquímicos	Fermentación	Etanol, biogás	Transporte, industria química, calefacción, electricidad.
	Digestión anaeróbica		
Extractivos	Extracción fisicoquímica	Aceites, éteres, hidrocarburos.	Transporte, industria química.

Los tratamientos mecánicos o físicos son los que emplean la tecnología más simple, ya que suelen ser molinos o trituradoras los que se destinan a estas actividades. Las técnicas de trituración y astillado ofrecen una manera práctica de transporte y uso de la biomasa, mientras que la compactación está referida a una densificación de la materia a una alta presión, como lo son las briquetas.

Dentro de los procesos termoquímicos podemos encontrar técnicas como la combustión, licuefacción, pirólisis y gasificación. La diferencia entre estos tratamientos son la atmósfera en

la cual se realizan. La licuefacción es realizada a temperaturas que van desde los 280-400°C a presiones altas, alrededor de 27MPa, donde el residuo se descompone en varios fragmentos en presencia de agua, esto produce una mezcla de hidrocarburos. Por otra parte, la combustión se realiza en una atmósfera de exceso de oxígeno (aire), dando como producto principal el calor. Respecto a la pirólisis, se realiza en una atmósfera casi nula de oxígeno, con acción de calor, y de la descomposición de la biomasa se obtienen gases, biochar y aceites. Es importante entender la pirólisis, ya que es siempre el primer paso en los procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total y parcial de los productos primarios (Klug, 2012). El proceso de pirólisis consta de 3 etapas:

- Etapa 1. Se produce una descomposición lenta con producción de pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto es consecuencia de la ruptura de los enlaces debido a la alta temperatura a la que se lleva el proceso y consecuencia también de la liberación de gases retenidos en el carbón.
- Etapa 2. Se conoce como descomposición térmica activa. La temperatura aumenta y produce una fragmentación más profunda de la molécula de carbón, con la formación de hidrocarburos condensables y alquitrans. Esta etapa comienza alrededor de los 360°C, y finaliza cuando se han alcanzado temperaturas de 560°C aproximadamente.
- Etapa 3. Transcurre a temperaturas superiores a los 600°C, se caracteriza por la liberación gradual de hidrógeno y otros heteroátomos (Antonio, J., 2016)

2.4 GASIFICACIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico en el que la materia carbonada es transformada en un gas combustible con poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren promovidas por altas temperaturas en presencia de un medio gasificante (Nogués y Galindo, 2010).

A diferencia de la combustión, cuya energía proviene de la ruptura de los enlaces, la gasificación (Basu, 2018) acumula energía en los enlaces químicos de los gases producidos. Agrega hidrógeno y elimina el carbono de la materia prima hidrocarbonada, para producir gases con reducciones en la tasa carbono-hidrógeno en el combustible (Ruíz, 2013). El medio

gasificante o, también llamado, agente gasificante es de suma importancia, caso distinto a la pirólisis, con tres principales agentes utilizados: agua, aire y oxígeno. El poder calorífico y los productos están fuertemente influenciados en el tipo de medio gasificante.

De manera general, el proceso de gasificación consta de 3 etapas (Basu, 2018):

Pre calentamiento y secado. Considerando la humedad de la biomasa, no se puede realizar mucho para la humedad que es inherente y se halla en la estructura de la célula, sin embargo, los esfuerzos se concentran en eliminar la humedad que reside en la superficie. Convencionalmente en los procesos de gasificación es preferida la materia prima que contiene una humedad que no exceda del 10 al 20%, y para ello es realizado este tratamiento antes de entrar al gasificador.

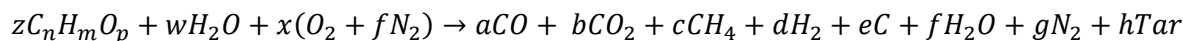
Descomposición térmica. Es posible llamarle pirólisis rápida o, en el caso que sea lenta, asociarlo a la carbonización. Para ambos casos, la volatilización de la biomasa implica una ruptura térmica de largas moléculas hidrocarbonadas en pequeñas moléculas gaseosas condensables y no condensables. De las moléculas condensables, es obtenido el tar, que en procesos industriales causa problemas, al ser un líquido pegajoso. El principal residuo que deja esta volatilización es el biochar.

Gasificación del biochar y componentes gaseosos. La serie de reacciones que ocurren entre hidrocarburos, dióxido de carbono, oxígeno, vapor e hidrógeno en el reactor, así como reacciones químicas entre los gases desprendidos, son algo particular de la gasificación (Tabla 6) Para las reacciones reversibles, su constante de equilibrio está fijada por la temperatura, y estas constantes de equilibrio son las que fijan la composición final del gas.

Tabla 6. Reacciones ocurridas en la gasificación

REACCIÓN CON CARBONO	
Boudonard:	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \frac{kJ}{mol}$
Agua-gas (Water- gas shift):	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \frac{kJ}{mol}$
Hidrogasificación:	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 73.8 \frac{kJ}{mol}$
	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111 \frac{kJ}{mol}$
REACCIONES DE OXIDACIÓN	
	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \frac{kJ}{mol}$
	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \frac{kJ}{mol}$
	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + H_2O - 803 \frac{kJ}{mol}$
	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O - 242 \frac{kJ}{mol}$
	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \frac{kJ}{mol}$
REACCIONES DE METANACIÓN	
	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \frac{kJ}{mol}$
	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 247 \frac{kJ}{mol}$
	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \frac{kJ}{mol}$
REACCIONES QUE PRODUCEN SYNGAS	
	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \frac{kJ}{mol}$
	$CH_4 + 0.5O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2 - 36 \frac{kJ}{mol}$

Toledo (2014) indica que la reacción global del proceso de gasificación es la siguiente:



Además del gas producido, se obtiene el biochar, que es el sólido restante, y un líquido aceitoso, al que se le llama tar.

Es de suma importancia considerar al momento del diseño del gasificador las reacciones. Existen varias tecnologías de gasificación, hablaremos de las dos principales (Toledo, 2014):

-Lecho móvil. Por el sentido de las corrientes de combustible y agente gasificante hay una subdivisión; se denomina gasificador de lecho móvil downdraft cuando las corrientes son paralelas, cuando circulan en sentido opuesto se denomina updraft o de contracorriente.

-Lecho fluidizado. Subdividida en tiro directo y downdraft, en la que el agente gasificante mantiene en suspensión a un gas inerte y al combustible hasta que las partículas de este se gasifican y se convierten en cenizas volátiles y estas son arrastradas por la corriente de Syngas. En el caso de los gasificadores de tipo invertido (downdraft), los hidrocarburos y alquitranes producidos en el proceso atraviesan un lecho incandescente de carbón que generalmente es vegetal transformándose en hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, entre otros, logrando así la descomposición total.

En este estudio se utilizará un gasificador con tecnología de lecho fluidizado, de tiro directo, además de un reactor catalítico acoplado de gamma alúmina impregnada en níquel, que aumenta la conversión a productos gaseosos deseables (CO , H_2 , CH_4).

Capítulo 3.

METODOLOGÍA

3.1. Caracterización de las materias primas

3.1.1 *Tamaño de partícula*

El aserrín utilizado es de una maderería típica de la ciudad de Morelia y rastrojo de frutillas fue donada por un productor de Michoacán. El tamaño de partícula influye en la cantidad de materia que se puede procesar en el biorreactor, a menor tamaño, más cantidad puede entrar en el reactor de pirólisis y se puede degradar mejor. Por tal motivo se utilizó una trituradora de ramas y hojas, instalada en GIRA (Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada) como pretratamiento físico al rastrojo de frutillas. Posteriormente, se tamizó con malla cédula 18, para obtener partículas con tamaño igual o menor a 1 mm.



Figura 8. Trituradora de ramas y hojas (Izquierda). En la derecha, tamiz de rastrojo de frutillas (Arriba). Tamiz de aserrín de pino (abajo).

3.1.2 Determinación de la humedad

Se calculó el peso anhidro de crisoles de porcelana colocando 6 de éstos en un horno de secado esmaltado digital marca *NOVATECH*, a una temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ por 1 hora hasta peso constante. Una vez pesados los crisoles se adicionó por triplicado 1g materia prima tamizada (aserrín y rastrojo de frutillas), posteriormente las muestras se sometieron a una temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ en un horno de secado, y se midió el peso de las muestras cada 15 minutos por 1 hora hasta obtener una masa constante. Subsiguiente, se llevaron los crisoles a un desecador para mantener la muestra anhidra, las masas secas se registraron en una balanza analítica marca Citizen modelo CX 265 con precisión de $\pm 0.00001\text{g}$.



Figura 9. Secuencia de la determinación de humedad

La humedad quedó determinada por el promedio de las pruebas por triplicado de la diferencia de pesos entre la masa seca y la masa húmeda.

3.1.3 Análisis elemental.

Este análisis permite establecer el porcentaje en peso de los elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y azufre (S). (Ríos I, 2017).

Este análisis se realizó en el Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad (LANIES), de la UNAM en donde cuentan con un analizador de C, H (Hidrógeno), N y S de la serie *Thermo Scientific FLASH 2000*. El equipo está diseñado para la determinación de manera automatizada el porcentaje de C-H-N-S y C-H-N en muestras sólidas.

3.2 Producción de Metano y Carbón vegetal

3.2.1 Operación del reactor de gasificación

El equipo empleado fue el GASIFICADOR EMII-01, el cual consta de un reactor de pirólisis (Figura 10), acoplado a un reactor catalítico cargado con pellets de catalizadores de gamma-alúmina impregnados con Níquel (10%) por medio de una serie de válvulas, que permiten medir y manipular presión en el equipo, tomar muestras, almacenar o quemar el gas. También se puede manipular la temperatura por medio del panel de sensores en los reactores catalítico y de pirolisis con un termopar tipo K con un rango de medición de 0-400°C y una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$. Cabe mencionar que para esta parte es fundamental el cálculo previo de la humedad, tomando en cuenta que no exceda el 12% para el óptimo funcionamiento del equipo, según recomendaciones en el manual del usuario del equipo.

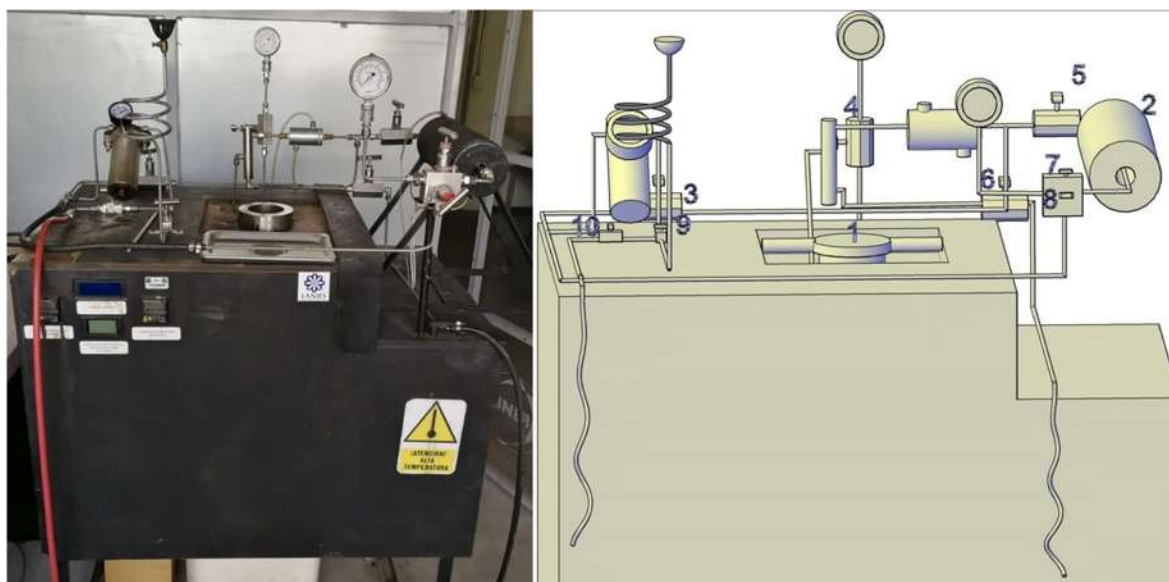


Figura 10. Gasificador EMII-02 (izquierda), Diagrama del Gasificador EMII-02 (Derecha).
Elaboración propia

En la Figura 10, se identifican las siguientes partes:

1. *Reactor de pirólisis*. El reactor es tipo batch y es donde se introduce la materia prima a gasificar. Tiene una capacidad que depende del tamaño de partícula, pero se manipulan únicamente 200 gramos, para evitar llevar el equipo presiones por arriba de los 10 kg/cm².

2. *Reactor catalítico*. Este reactor de tipo tubular contiene los catalizadores, cuya vida útil es solo para una carga; una vez terminada la corrida se reactivan estos catalizadores, llevando la temperatura a 370°C por 20 minutos (Toledo, 2014).

3, 4, 5, y 6. *Válvulas*, capaces de soportar una presión de 10,000 psi.

7 y 8. *Válvulas*, para una presión hasta de 6,000 psi.

9 y 10. *Válvulas*, para presión hasta de 3,000 psi.

Todas las válvulas son tipo aguja, lo que vuelve sencilla la regulación de los caudales del gas.

La circulación del flujo está indicada en el diagrama P&ID de la Figura 11.

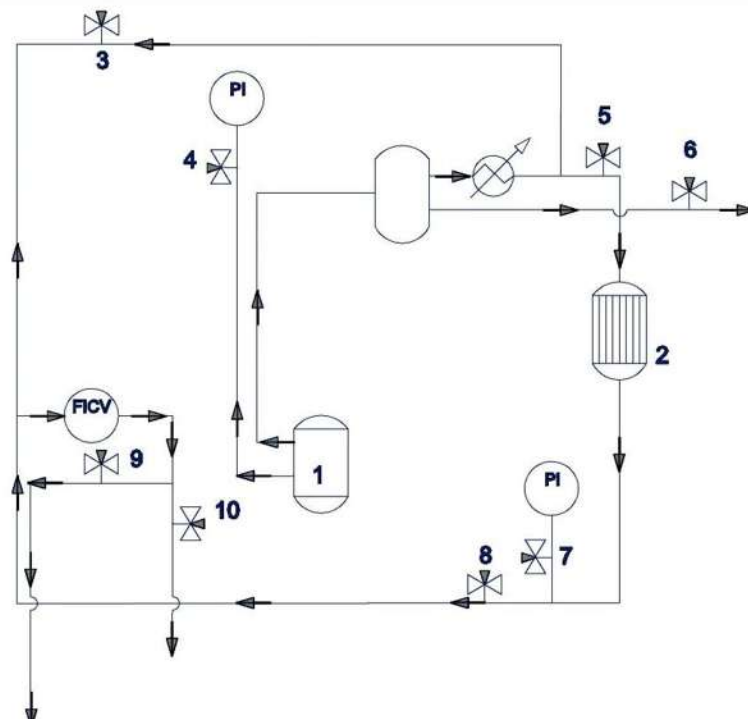


Figura 11. Diagrama P&ID del gasificador EMII-02. Elaboración propia

3.2.2 Efecto de la temperatura, catalizador y materia prima en el gasificador en el rendimiento de producción del metano y carbón vegetal

Ya que este trabajo busca obtener metano y carbón vegetal para diversas aplicaciones, es de interés observar qué factores pueden afectar su producción al momento de utilizar el reactor de gasificación. Por ello, se estudiaron tres variables de posible importancia en el porcentaje de metano obtenido: temperatura, catalizador y materia prima.

En el caso de la temperatura, se desconoce en un inicio el comportamiento de la producción de metano y carbón vegetal sometiendo la materia prima a cierta temperatura, por lo que la elección de las temperaturas está basada en diagramas termogravimétricos, TGA, (pérdida de volátiles vs temperatura) que indican el rango de temperatura en el que la materia presenta puntos importantes de degradación, es decir, cuando se encuentra en el final de la gasificación y hay mayor desprendimiento de volátiles (APÉNDICE A).

Para el caso del uso del catalizador, cuando el reactor de pirólisis termina su operación, el siguiente paso puede ser alinear el gas hacia el reactor catalítico o alinearlo a la salida del reactor, entendiéndose que hay dos opciones: usar el catalizador o no usarlo.

Tomando en consideración esas características, además de las dos materias primas elegidas: rastrojo de frutillas y aserrín de pino, la propuesta para observar el comportamiento de las variables de importancia es un diseño de experimentos factorial, en el que en cada ensayo completo o réplica del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores (Montgomery, D. y Runger, G., 2003). Los factores a analizar como se dijo anteriormente, son la temperatura, el catalizador y la materia prima. Estos tres factores se observarán en dos niveles (Diseño 2^3). Para la temperatura estos niveles se consideran un valor mínimo (-) y un máximo (+) que se basaron en los rangos que manejan los análisis termogravimétricos de Toledo (2014) y las consideraciones para la operación del reactor de pirólisis. Para el catalizador, su uso será considerado el valor máximo y no usarlo, el mínimo. En el caso de la materia prima los niveles son el aserrín de pino y el rastrojo. Éstos últimos dos

factores, catalizador y materia prima, son de tipo cualitativo. En la siguiente tabla se encuentra la matriz de experimentos propuesta (Tabla 7).

Tabla 7. Matriz de Experimentos para el análisis del efecto conjunto de la temperatura y el catalizador en la obtención de metano y carbón vegetal

Nivel	Factores					
	Temperatura (°C)		Catalizador	Materia prima		
	x_1		x_2		x_3	
Bajo (-)	280		No	Aserrín de pino (A)		
Alto (+)	310		Sí	Rastrojo de frutillas (B)		
Experimento	Matriz de experimentos			Plan de experimentación		
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	-	-	-	280	No	A
2	+	-	-	310	No	A
3	-	+	-	280	Sí	A
4	+	+	-	310	Sí	A
5	-	-	+	280	No	B
6	-	+	+	280	Sí	B
7	+	-	+	310	No	B
8	+	+	+	310	Sí	B

La combinación de factores y niveles arroja un total de 8 experimentos. Se realizarán 3 réplicas por experimento, cuyos resultados se estudian en este trabajo a través de un análisis de varianza.

ANOVA

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar

las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente. (MINITAB, 2019).

Para 3 distintos factores, A , B y C con sus correspondientes interacciones y para n repeticiones el ANOVA se resume en la Tabla 8.

Tabla 8. Tabla del análisis de varianza del modelo de 3 factores con efectos fijos (Montgomery & Runger, 2003)

Fuentes de variación	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuadrados medios esperados	F
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c - 1$	MS_C	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c - 1}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	MS_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	MS_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	MS_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	σ^2	
Total	SS_T	$abcn - 1$			

Las fórmulas para el cálculo del ANOVA son mostradas en la Tabla 9, donde se observa también el modelo fundamental en el que está basado el cálculo.

Tabla 9. Cálculos para el ANOVA de 3 factores. (Montgomery & Runger, 2003)

Cálculo suma de cuadrados		Cálculo cuadrado medio
$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bcn} - \frac{y_{...}^2}{abc}$	$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{acn} - \frac{y_{...}^2}{abcn}$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$
$SS_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{.k.}^2}{abn} - \frac{y_{...}^2}{abcn}$	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$
$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{cn} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$		$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$
$SS_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{i.k.}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$		$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$
$SS_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{.jk.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$		Modelo fundamental
$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$		$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$ $\begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{cases}$

El cálculo del error de la suma de los cuadrados (SS_E) se obtiene de restarle a la suma total, SS_T , la suma de los cuadrados de los efectos principales y de las interacciones. En este trabajo todos los cálculos anteriormente mencionados para el análisis del modelo serán realizados en la herramienta estadística MINITAB.

3.2.3 Análisis de gases a la salida del gasificador.

Para la medición de gases, el biorreactor se colocó bajo un sistema con campana para la recolección de gases, que cuenta con un diseño en su tubería de extracción para muestreo de gases y aerosoles. (Figura 12)



Figura 12. Instalación del GASIFICADOR EMII-01 y equipos de muestreo.

Se acopló a dicha tubería la salida de gases del reactor gasificador a través de un tubo de cobre. El metano producido, además de otros hidrocarburos de cadena corta como etileno, acetileno, propano, propileno, butano y propino, se midieron el Cromatógrafo Analizador de Gases (*Young Li Instrument 6500*) (Figura 13).



Figura 13. Cromatógrafo Analizador de Gases Young Li Instrument 6500

También se midió el CO y CO₂ en tiempo real, a través de un sistema de monitoreo de emisiones (LEMS, por sus siglas en inglés), en el que las concentraciones de CO se miden con un sensor electroquímico y para CO₂ con un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR, por sus siglas en inglés). Los sensores fueron calibrados usando nitrógeno y una mezcla de 500 ppm de CO y 5000 ppm de CO₂. El flujo es calculado mediante la caída de presión generada en la tubería de muestreo (Ruiz-García, *et al* 2018; Ruiz-García, 2018).

El cromatógrafo realiza muestreo para análisis cada 10 minutos, mientras que el LEMS cada dos segundos. Para dichas mediciones en tiempo real, la toma de muestras se hizo directo de la salida del reactor catalítico cuando se utilizó el catalizador, y en la válvula 3 para el caso contrario, evitando así el paso por el filtro de presión, que es donde el gas se acumula. (Figura 14).

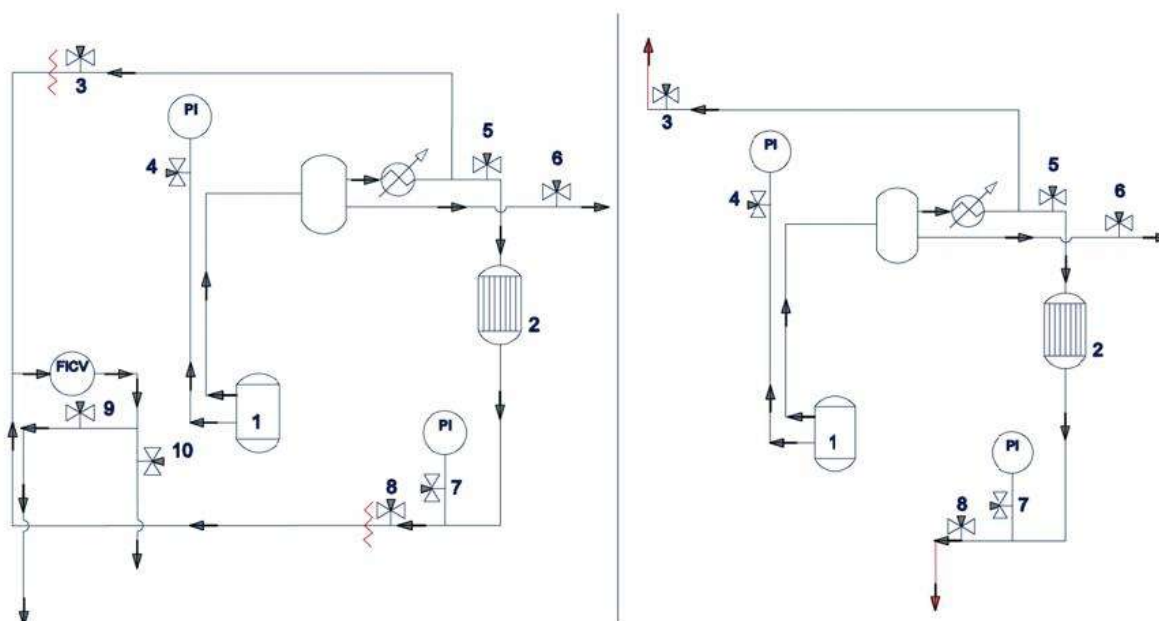


Figura 14. El Diagrama P&D de la izquierda muestra en rojo los lugares donde se tomará muestra. En la izquierda se aprecia el diagrama final, con las salidas para muestreo en color rojo.

3.3 Elaboración de pellets

La elaboración de pellets se realizó en el Laboratorio de ingeniería en Biosistemas, de la Universidad de Querétaro. El equipo utilizado para dicha labor fue una máquina peletizadora modelo *KL 120 B*, la cual requiere aproximadamente un kilo de materia prima que, se estima, produce de 400 a 500 g de pellets. Se buscó una mezcla óptima para biochar-aserrín y biochar-rastrojo, buscando lograr una textura totalmente homogénea para ambos casos.



Figura 15. Peletizadora. (Ríos, I., 2017)

En la Tabla 10 se muestra la planeación de mezclas, a raíz de los 4 tipos de biochar obtenidos y las dos materias primas que se manejaron.

Tabla 10. Planeación de las mezclas para producción de pellets.

MATERIA PRIMA	CARBÓN VEGETAL	MEZCLA
Aserrín de pino (A)	(1) Biochar Aserrín de pino (280°C)	A1
	(2) Biochar Aserrín de pino (310°C)	A2
Rastrojo de frutillas (B)	(1) Biochar Rastrojo de frutillas (280°C)	B1
	(2) Biochar Rastrojo de frutillas (310°C)	B2

La mezcla óptima de peletizado se encuentra en función de la cantidad de materia prima-biochar por mezcla y el aglutinante adicionado, que para este caso es el agua. Así pues, se realizó la variación en estos dos parámetros en la producción de los pellets hasta encontrar una mezcla para la cual los pellets no sufrieran desintegración además de que fueran homogéneos visualmente.



Figura 16. Proceso de pelletizado en la primera ronda de la mezcla B1.

Se utilizó el mismo método de variación de parámetros para encontrar las 4 mezclas óptimas. En la Tabla 11 se observa la secuencia de la variación del aglutinante y las proporciones de la materia prima y biochar para la primera mezcla, A1, donde en la última línea se muestra las cantidades correspondientes a la mezcla óptima subrayado en negritas.

Tabla 11. Variación de Biochar-Aserrín-Humedad para mezcla óptima de pelletizado de la muestra A1.

Biochar de aserrín de pino a 280° (% en peso) (Muestra A)	Aserrín (% en peso)	Humedad (% en peso)
100	0	10, 20, 30,40
95	5	20, 30,40
90	10	20, 30,40
80	20	20, 30,40
70	30	20, 30,40
65	35	20, 30,40
60	40	20, 30, 40

Todos los estudios mencionados anteriormente, a excepción de la trituración del rastrojo de frutillas y la elaboración de pellets, fueron realizados en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB).

Capítulo 4.

RESULTADOS

4.1 Caracterización de las materias primas

De las pruebas para el cálculo del contenido de humedad en base húmeda (Hbh), es decir, el cociente de la masa de agua medida entre la masa húmeda, realizadas para las materias primas de este estudio con tamaño de partícula menor a 1 mm se aprecia que, para el aserrín de pino, la Hbh es de $9.2 \pm 0.4\%$. Mientras que para el rastrojo de frutillas la Hbh es de $9.9 \pm 0.2\%$. Para ambos casos, se cumple que la humedad es menor al 12%, como se sugiere para un mejor desempeño del reactor, por lo que no es necesario ningún tratamiento físico de secado previo a la producción de carbón vegetal y metano (Tabla 12 y Apéndice C).

Tabla 12. Humedad en base húmeda del aserrín de pino y rastrojo de frutillas

Humedad del rastrojo de frutillas		Humedad del aserrín de pino	
Hbh promedio (% en peso)	Desviación Estándar	Hbh promedio (% en peso)	Desviación Estándar
9.94	0.15	9.18	0.39

En la Figura 17 se muestran las diferencias entre la materia prima antes y después del proceso de tamizar con malla cédula 18, donde se observan diferencias significativas en el tamaño de partícula.



Figura 17 Aserrín de pino (arriba) y rastrojo de frutillas (abajo), antes y después de tamizar.

En la Tabla 13 se muestra el análisis elemental realizado en el LANIES, donde se observa que el elemento con mayor presencia en la composición de ambas materias primas es el carbono, como suele suceder en las estructuras moleculares de la materia orgánica. En este caso, el aserrín de pino cuenta con un porcentaje en peso de 47.4%, mayor al del rastrojo de frutillas, 47.3%. Después del carbono, el hidrógeno es el siguiente componente mayoritario, 6.2% y 6.1 %, para el aserrín de pino y el rastrojo de frutillas, respectivamente.

Tabla 13. Análisis elemental de las materias primas, aserrín de pino y rastrojo de frutillas.

MATERIA PRIMA		N	C	H	S
Aserrín de pino	%	0.18	47.37	6.19	0
	SD	0.01	0.01	0.02	0
Rastrojo de frutillas	%	1.20	47.26	6.14	0
	SD	0.07	0.20	0.19	0

Nota: Ninguna de las dos materias primas presenta azufre en su composición. El % representa el porcentaje en peso promedio y SD la desviación estándar

4.2 Producción de metano y carbón vegetal.

La gasificación de residuos lignocelulósicos en el GASIFICADOR EMII-01, realizada bajo campana de extracción para muestreo de gases, tomó en promedio 3 horas por lote, aprovechándose el calor residual de la primera corrida del día para las siguientes corridas. Para todas las pruebas, la medición en tiempo real comenzó cuando el reactor de pirólisis indicaba 10 kg/cm^2 de presión (máxima presión que soporta el reactor de pirólisis), cuya duración fue en promedio de 33 minutos, dando por terminado el lote cuando la presión en el manómetro del reactor de pirólisis indicaba 0 kg/cm^2 .

En la Tabla 14 se concentran las mediciones realizadas en los productos de la gasificación para las condiciones elegidas de temperatura y el catalizador en 8 pruebas con sus réplicas, donde se muestran la emisión de metano en miligramos obtenida en el producto gaseoso medido y los gramos de carbón vegetal para cada caso.

Si comparamos las emisiones de metano (Tabla 14) con la Tabla 22 del APÉNDICE B se observa que la cantidad de emisiones de CO_2 y el CO es muy alta respecto las emisiones de metano, teniendo éstas últimas un mínimo de 40 mg en el aserrín de pino a 280°C sin uso de catalizador, un máximo de 1162.4 mg, en el aserrín de pino a 310°C , con catalizador y un promedio 298.2 ± 272.5 mg. En cuanto al biochar, sus valores mínimo y máximo son 109 g y 139 g, en aserrín de pino a 310°C con uso del catalizador y aserrín de pino a 280°C sin catalizador, respectivamente, con un promedio de 129 ± 8 g.

Al comparar los valores mínimos y máximos de los productos, se distingue una relación inversamente proporcional entre el metano y el carbón vegetal. A mayor metano, menor cantidad de carbón vegetal, y para la inversa; a menor metano, mayor cantidad de carbón vegetal.

Tabla 14. Carbón vegetal y emisiones de metano, productos de la gasificación.

Prueba	Uso del catalizador	Temperatura reactor pirólisis $\pm 5(^{\circ}\text{C})$	Réplica	Materia prima	Emisiones de CH ₄ (mg)	Carbón vegetal (g)
1	SI	280	1	Aserrín de pino	121.6	134
2			2		163.8	135
3			3		165.3	134
4		310	1		627.2	109
5			2		1162.4	111
6			3		519.2	116
7	NO	280	1		82.6	139
8			2		165.5	134
9			3		40.0	139
10		310	1		201.8	123
11			2		182.0	124
12			3		326.7	124
13	SI	280	1	Rastrojo de frutillas	972.6	130
14			2		293.0	129
15			3		186.9	136
16		310	1		158.6	129
17			2		151.1	129
18			3		176.5	129
19	NO	280	1		321.9	132
20			2		302.4	135
21			3		285.7	134
22		310	1		274.9	131
23			2		197.9	131
24			3		77.7	129

Se obtuvo carbón vegetal bajo 4 condiciones distintas, (Figura 18) además en la Tabla 15 se observa el porcentaje en peso de su composición de carbono, resultado del análisis elemental.

Tabla 15. Porcentaje en peso del carbono en las materias primas.

Combustible	T(°C)	Promedio (% en peso)	SD
Aserrín pino	280	57.9	0.08
	310	60.1	2.91
Poda de frutilla	280	55.1	0.25
	310	55.6	0.39

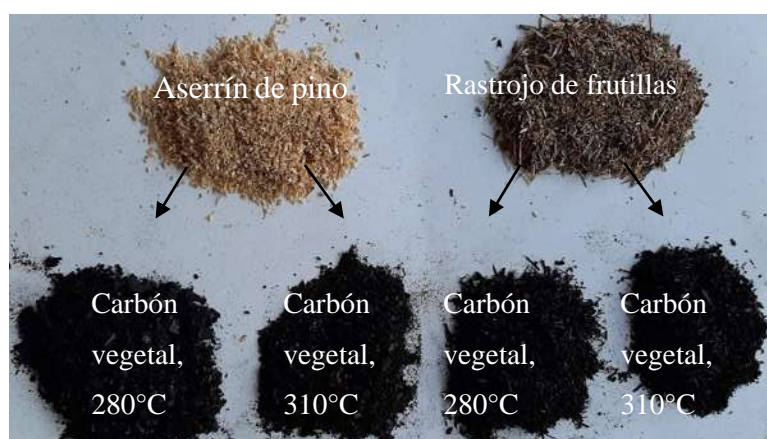


Figura 18. Carbón vegetal, producto de la gasificación

Los resultados del porcentaje en peso del carbono muestran que su composición tiene una variación muy pequeña en cuanto a las distintas temperaturas a las que se obtiene, siendo el carbón vegetal procedente del aserrín de pino obtenido a 310°C el de mayor porcentaje en peso, $60.1 \pm 2.9\%$.

Se han realizado otros estudios donde se observa el rendimiento del biochar o carbón vegetal a partir de otro tipo de biomasa, tal es el caso de la palma aceitera (Arafat H. et al, 2016), donde el porcentaje en peso del carbón vegetal obtenido es un promedio de 27.5%. Si comparamos este porcentaje con el de las biomásas analizadas en este caso, donde el promedio del porcentaje en peso para el aserrín de pino es de 63.4% y de 65.6% para el rastrojo de frutillas, se observa que las materias analizadas en este caso dan rendimientos altos de biochar comparados con el de la palma aceitera.

4.3 Análisis estadístico del efecto de las variables supuestas de importancia en la producción del metano y carbón vegetal

Para el estudio del efecto de los factores, temperatura, catalizador y materia prima, se utilizó el software de herramientas estadísticas y análisis de datos MINITAB. Primero se generó el diseño factorial planteado para los tres factores en 2 niveles y la respectiva variable de respuesta (Productos de metano y carbón vegetal) con 3 réplicas por experimento. (Tabla 16)

Tabla 16. Diseño Factorial para análisis del efecto de las variables de supuesta importancia en la producción de metano y carbón vegetal.

Std	Run	CenterPt	Blocks	T (°C)	Uso del catalizador	Materia prima	Emisiones de CH4 (g)	Carbón vegetal (g)
4	1	1	1	310	Sí	Aserrín de Pino	0.6272	109
17	2	1	1	280	No	Aserrín de Pino	0.0826	139
24	3	1	1	310	Sí	Rastrojo Frutillas	0.1586	129
8	4	1	1	310	Sí	Rastrojo Frutillas	0.1511	129
22	5	1	1	310	No	Rastrojo Frutillas	0.2749	131
14	6	1	1	310	No	Rastrojo Frutillas	0.1979	131
23	7	1	1	280	Sí	Rastrojo Frutillas	0.9726	130
18	8	1	1	310	No	Aserrín de Pino	0.2018	124
20	9	1	1	310	Sí	Aserrín de Pino	1.1624	111
9	10	1	1	280	No	Aserrín de Pino	0.1655	134
2	11	1	1	310	No	Aserrín de Pino	0.1820	123
12	12	1	1	310	Sí	Aserrín de Pino	0.5192	116
13	13	1	1	280	No	Rastrojo Frutillas	0.3219	132
3	14	1	1	280	Sí	Aserrín de Pino	0.1216	134
21	15	1	1	280	No	Rastrojo Frutillas	0.3024	135
16	16	1	1	310	Sí	Rastrojo Frutillas	0.1765	129
15	17	1	1	280	Sí	Rastrojo Frutillas	0.2930	129
5	18	1	1	280	No	Rastrojo Frutillas	0.2857	134
11	19	1	1	280	Sí	Aserrín de Pino	0.1638	134
19	20	1	1	280	Sí	Aserrín de Pino	0.1653	135
10	21	1	1	310	No	Aserrín de Pino	0.3267	124
1	22	1	1	280	No	Aserrín de Pino	0.0400	139
7	23	1	1	280	Sí	Rastrojo Frutillas	0.1869	136
6	24	1	1	310	No	Rastrojo Frutillas	0.0777	129

4.3.1 ANOVA para el carbón vegetal

El diseño factorial se examinó a través de un Análisis de Varianza (ANOVA) para cada producto. Los resultados encontrados para el ANOVA del carbón vegetal se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. ANOVA para la producción del carbón vegetal (g).

Fuente	G. L.	Ajuste SS	Ajuste MS	F-valor	P-valor
Temperatura (°C)	1	661.50	661.500	132.30	0.000
Uso del catalizador	1	121.50	121.500	24.30	0.000
Materia prima	1	112.67	112.667	22.53	0.000
Temperatura (°C)*Uso del catalizador	1	24.00	24.000	4.80	0.044
Temperatura (°C)*Materia prima	1	337.50	337.500	67.50	0.000
Uso del catalizador*Materia prima	1	48.17	48.167	9.63	0.007
Temperatura (°C)*Uso del catalizador*Materia prima	1	32.67	32.667	6.53	0.021
Error	16	80.00	5.000		
Total	23	1418.00			

El modelo de regresión lineal del ANOVA está en función de la prueba de Fischer, F-valor, y la prueba de probabilidad; P-valor. La prueba de Fischer es el cociente de las varianzas del modelo de regresión lineal sobre las varianzas de los residuos. Para aceptar que cierto factor es significativo estadísticamente, los valores para F calculados en el ANOVA deben ser altos comparados con los valores de F críticos que son los ya calculados y establecidos para cierta confiabilidad (α) y grados de libertad (GL). En este caso, se analizó para una confiabilidad del

95% ($\alpha=0.05$) y los grados de libertad que dicta el modelo son 7 GL para tratamientos, 16 GL para error. F crítico es para este caso: $F_{0.05, 7, 16}=2.66$ (Montgomery y Runger, 2003). Como $F\text{-valor} \gg F\text{-crítico}$ para el ANOVA del carbón vegetal, se comprueba que el modelo es estadísticamente significativo. Ahora bien, el P-valor indica si hay un efecto del factor o la interacción entre factores sobre la variable de respuesta. Para que un efecto sea significativo se tiene que: $P\text{-valor} \leq \alpha$. En el ANOVA del carbón vegetal se concluye que los efectos principales (Temperatura, uso del catalizador y materia prima) además de sus interacciones de segundo y tercer orden fueron significativas estadísticamente para un $\alpha=0.05$.

Para la validación del modelo del análisis de varianza, se graficaron los residuos contra distintas variables (Figura 19). En el gráfico de probabilidad normal (Normal Probability) se observa que se sigue una línea recta, pero presenta algunos valores atípicos, lo que se confirma con la barra alejada en la campana del histograma (Histogram). Sin embargo, en el gráfico de Valores ajustados vs Residuos (Versus Fits), se observa homocedasticidad, esto es, que los errores de estimación son constantes a lo largo de las observaciones, que es deseable para confiar en el modelo. Con el gráfico de Residuos vs Orden (Versus Order), se confirma que los valores son independientes entre sí, debido a que se ubican de manera aleatoria alrededor de la línea central, sin mostrar tendencias y/o patrones cronológicos.

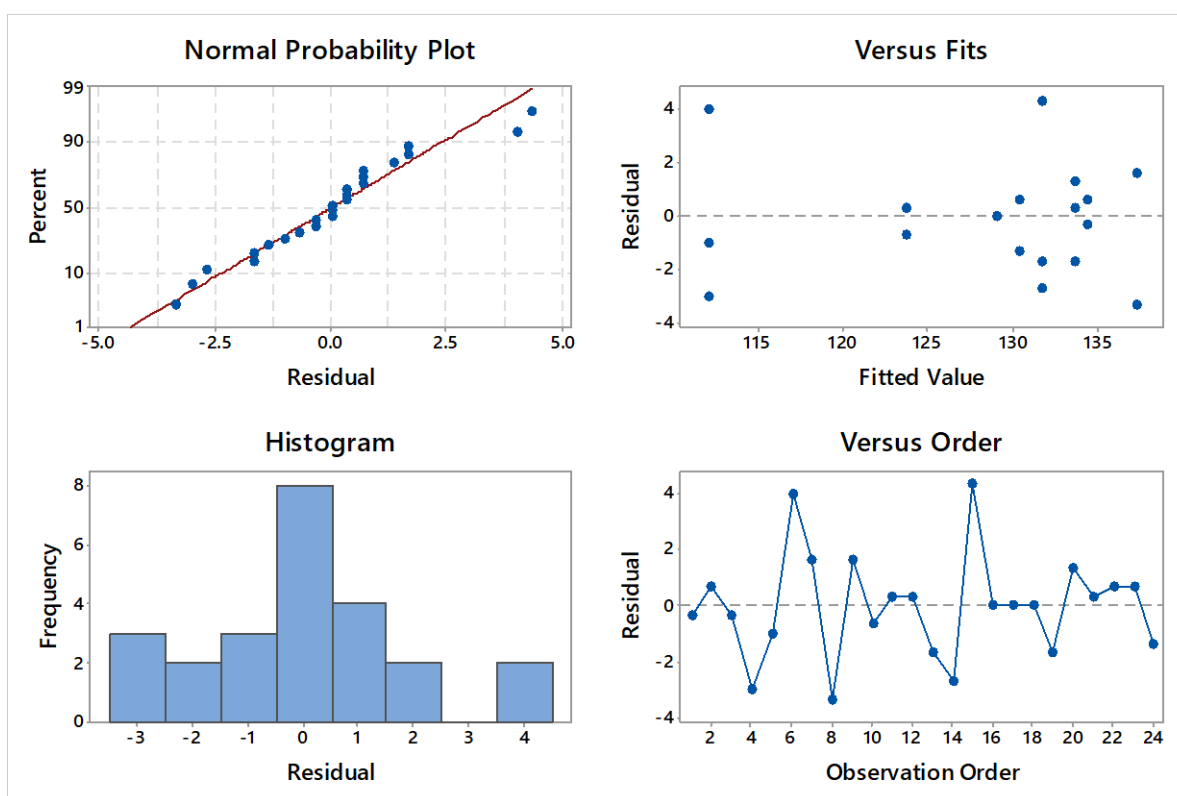


Figura 19. Gráficas de residuos para la validación de supuestos del análisis de varianza del carbón vegetal en el modelo de regresión lineal.

Los efectos principales del ANOVA se encuentran graficados en la Figura 20. Observamos en el gráfico de Temperatura vs Promedio de carbón vegetal (Temperatura °C vs Mean), que el aumento de temperatura tiene un impacto negativo en la cantidad de carbón vegetal que se obtiene, esto es, la línea tiene una pendiente negativa, también se observa que la máxima cantidad de carbón vegetal que se puede obtener está en este punto, acercándose a los 135 g. En el uso del catalizador, cuando se prescinde de él, hay un impacto positivo en la producción de carbón vegetal, así mismo para el caso de usar como materia prima el rastrojo de frutillas. En este caso, las máximas cantidades de carbón vegetal se obtienen en la temperatura de 280°C, sin catalizador y utilizando rastrojo de frutillas.

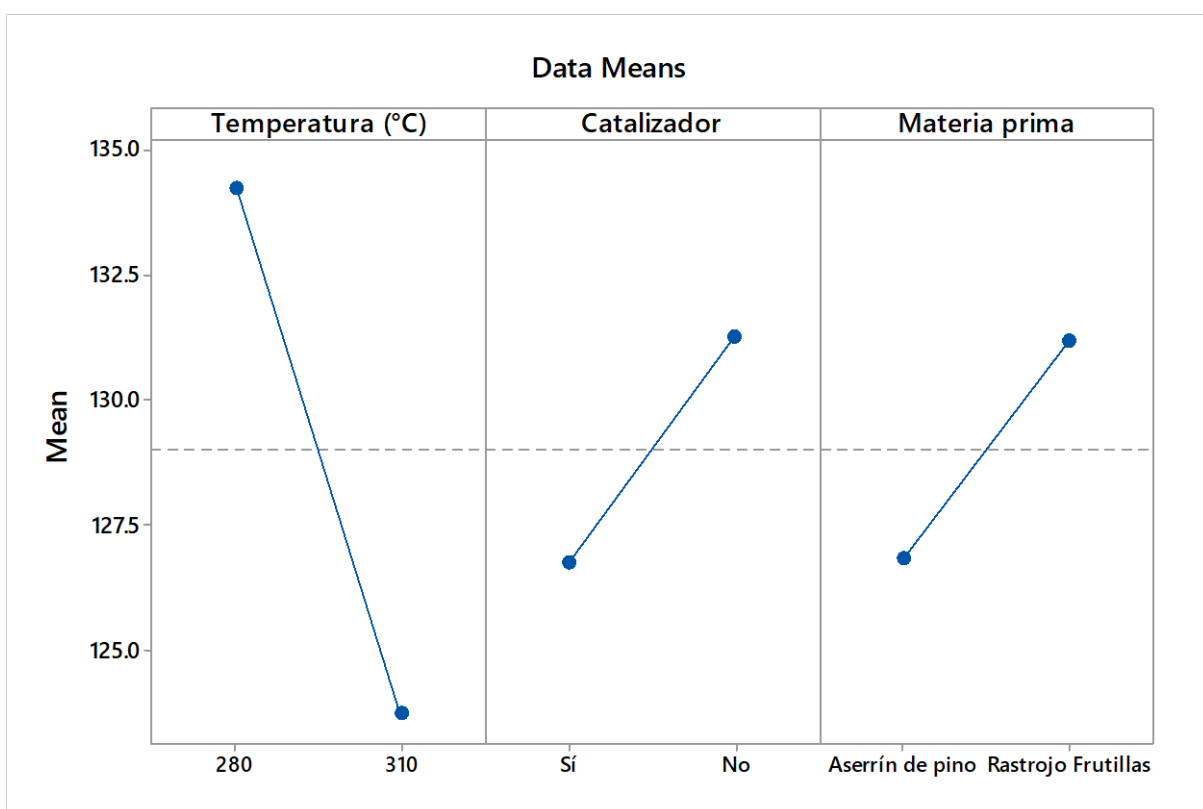


Figura 20. Efectos principales en el ANOVA para carbón vegetal.

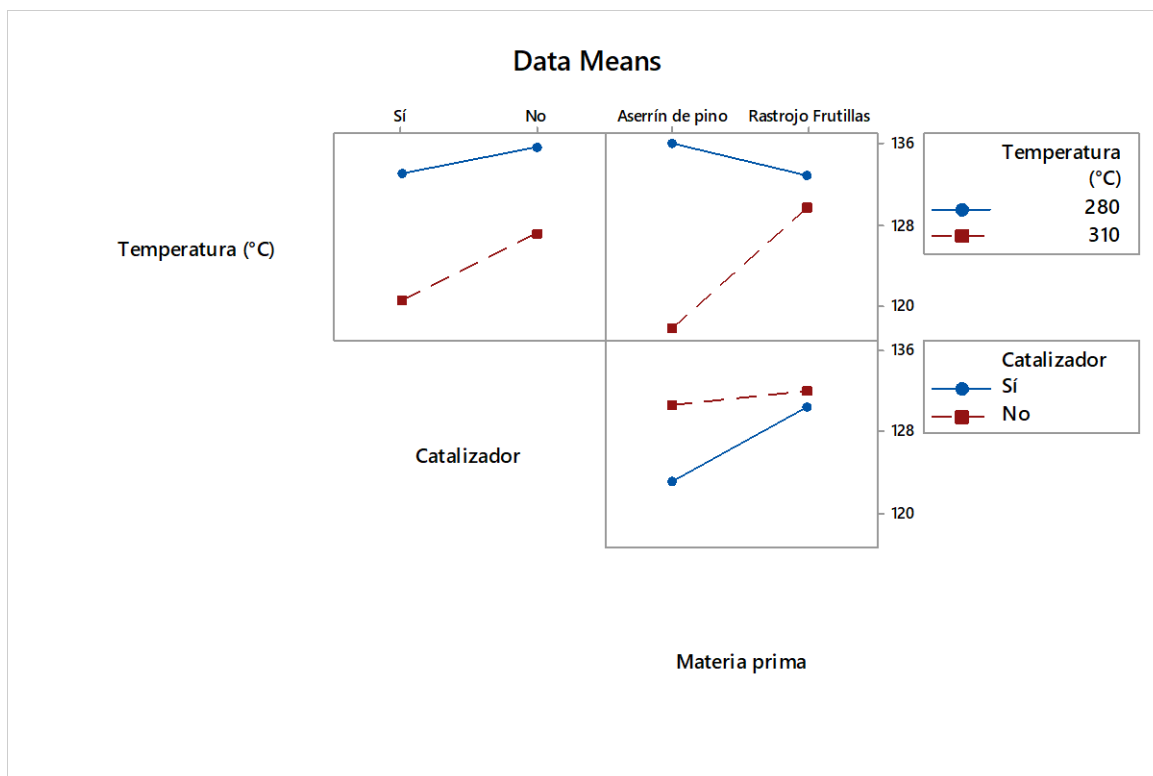


Figura 21. Interacción de efectos del ANOVA para el carbón vegetal

Las gráficas para la interacción de efectos para el carbón vegetal se muestran en la Figura 21. En el primer gráfico, Catalizador vs Temperatura, se muestran dos líneas casi paralelas, lo que puede indicar que no existe una interacción entre tales efectos, sin embargo, como se puede observar en la Tabla 17, dicha interacción es significativa y, según la tendencia de las líneas en el gráfico, se unirán en un punto donde la temperatura aumenta y el catalizador no se utiliza, produciendo una cantidad de carbón vegetal por arriba de la media. Para la interacción de la temperatura con la materia prima las líneas de sus efectos se notan próximas a unirse, lo que confirma que existe una interacción entre ambos factores, mismo caso para la interacción sin culminar del catalizador y la materia prima, que muestra que pese a que no importa mucho la materia prima cuando no se utiliza el catalizador, ya que la línea es casi horizontal, el uso del rastrojo de frutillas maximiza la cantidad de carbón vegetal producida para ambos casos.

4.3.2 ANOVA para metano

En el Análisis de Varianza para las emisiones de metano (Tabla 18), únicamente se cumple que $F\text{-valor} \gg F\text{-crítico}$ para el efecto “Uso del catalizador” y la interacción de “Temperatura*Materia prima”, que a su vez se refleja en el P-Valor donde se concluye que con un $\alpha=0.05$ únicamente un efecto principal, “Uso del catalizador” y la interacción de efectos de segundo orden “Temperatura*Materia prima” son estadísticamente significativos en las emisiones de metano, despreciándose los otros efectos.

Tabla 18. Análisis de Varianza (ANOVA) para las emisiones de metano (g).

Fuente	G. L.	Ajuste SS	Ajuste MS	F-valor	P-valor
Temperatura (°C)	1	0.03798	0.037977	0.94	0.346
Uso del catalizador	1	0.20890	0.208899	5.20	0.037
Materia prima	1	0.00537	0.005367	0.13	0.720
Temperatura (°C)*Uso del catalizador	1	0.02863	0.028628	0.71	0.411
Temperatura (°C)*Materia prima	1	0.54189	0.541892	13.48	0.002
Uso del catalizador*Materia prima	1	0.06855	0.068555	1.71	0.210
Temperatura (°C)*Uso del catalizador*Materia prima	1	0.17383	0.173825	4.32	0.054
Error	16	0.64319	0.040199		
Total	23	1.70833			

Ahora, para la validación de los supuestos del análisis del modelo de regresión lineal obtenido a través de los datos para el metano, se tienen las gráficas de residuos en la Figura 22.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que existe una distribución con valores atípicos, por los valores que se encuentran alejados de la secuencia de puntos, sin embargo, los datos tienen una secuencia que intenta ser lineal. Una vez más, estos valores atípicos son corroborados con el histograma, que presenta las barras alejadas del centro. Para la gráfica de valores ajustados, la distribución de puntos muestra homocedasticidad y en el gráfico de orden se observa una distribución aleatoria de puntos con cierto patrón en su final, por lo que no se puede confirmar que las variables sean independientes entre sí. Hay que considerar que las interacciones que sugiere como significativas pueden llegar a ser despreciables debido a las observaciones que presentó el modelo en su validación.

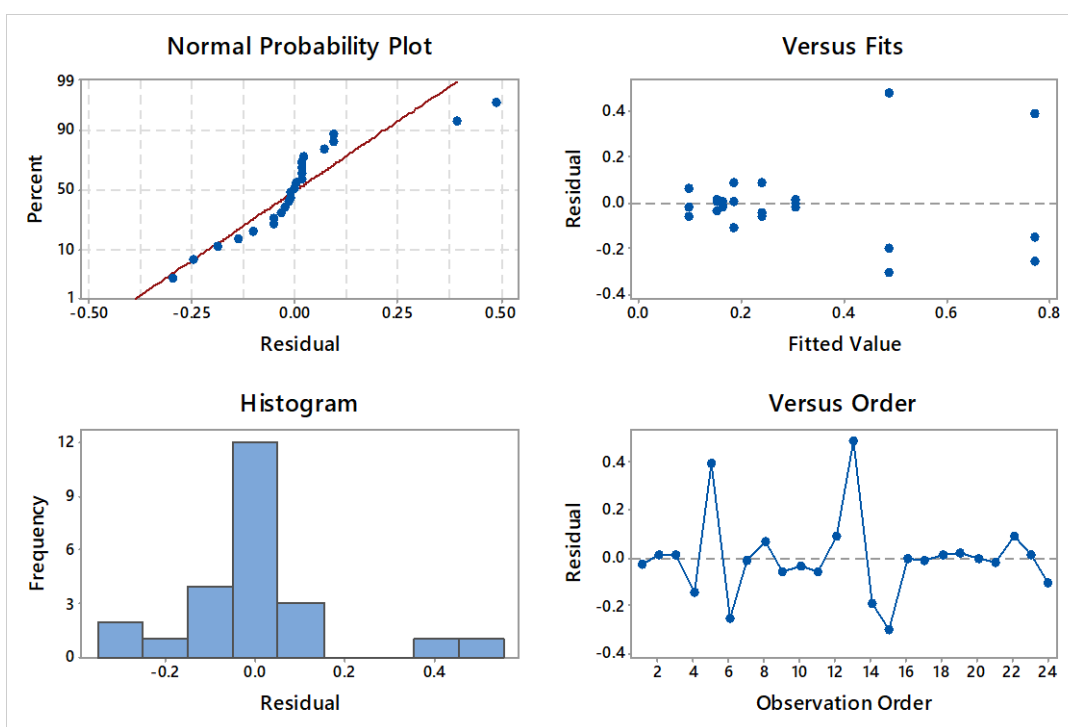


Figura 22. Gráficas de residuos para la validación de supuestos del análisis de varianza del metano en el modelo de regresión lineal.

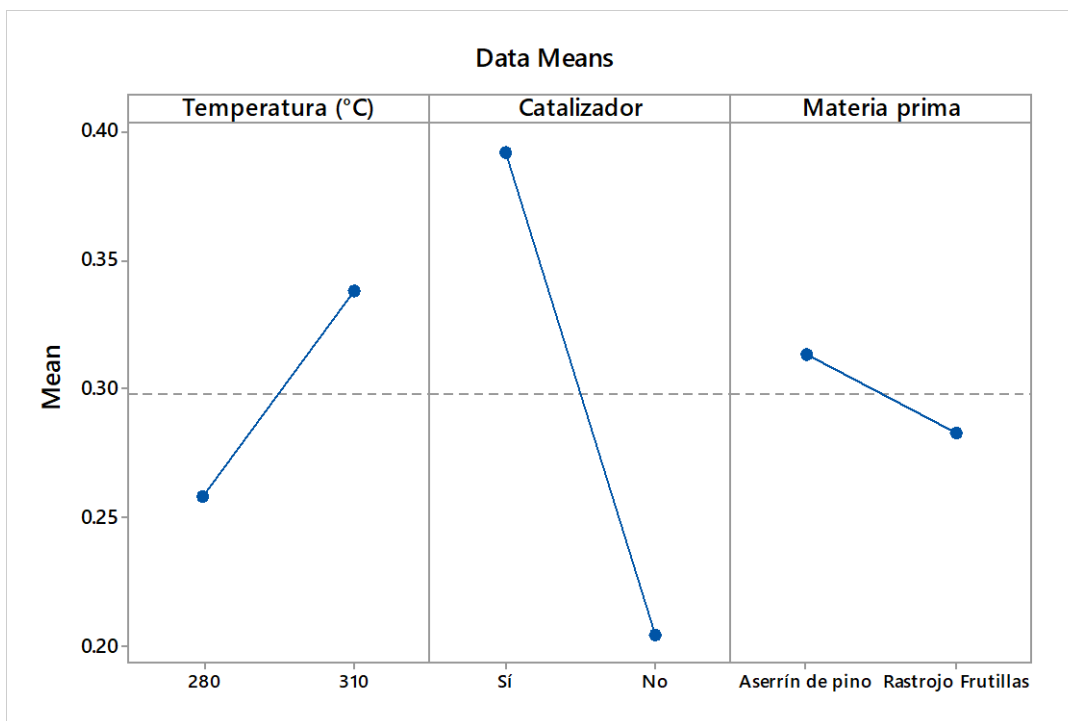


Figura 23. Efectos principales del ANOVA para metano.

Los efectos principales del ANOVA para el metano se pueden observar en la Figura 23. En la temperatura se observa un impacto positivo en el nivel alto, de 310 °C, mientras que, para el catalizador, su uso maximiza la cantidad de metano que se obtiene, siendo este efecto el que produce más emisiones de metano de los tres de manera individual, acercándose a los 400 mg. En el caso de la materia prima, su variación no tiene tanta influencia debido a que la línea que se traza es casi horizontal, aun así, la pequeña inclinación muestra que los valores máximos se obtienen al utilizar aserrín de pino. En conclusión, el valor máximo de metano con los tres factores principales se obtiene al gasificar aserrín de pino con una temperatura en el reactor de pirólisis de 310°C, utilizando el catalizador.

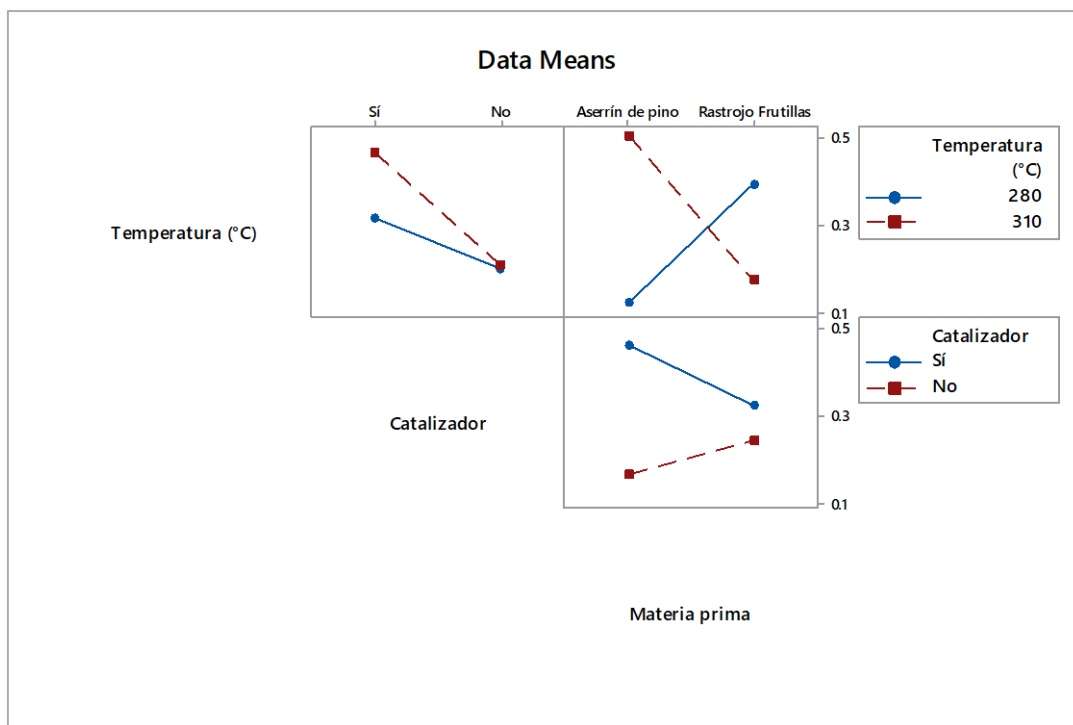


Figura 24 Interacción de efectos del ANOVA para el metano

En la Figura 24 se muestran las interacciones de los efectos del análisis de varianza para el metano, que en un primer gráfico tiene la interacción del efecto de la temperatura con el catalizador. El punto donde estos dos factores interactúan tiene una pendiente negativa, mostrando que prescindir del catalizador a temperaturas bajas produce metano en cantidades menores a la media. En el caso de la temperatura y la materia prima, se observa claramente una interacción entre dichos factores en el punto medio de la gráfica con inclinación casi despreciable hacia el uso del rastrojo de frutillas que produce metano en la media evaluada de los experimentos. Por último, los factores de catalizador de materia prima y catalizador muestran dos líneas próximas a unirse en señal de una posible interacción entre ellos, sin embargo, en dicha interacción, debido a la tendencia de las líneas, el metano se produce en niveles menores a la media

Finalmente, en el resumen del modelo estadístico mostrado en la Tabla 19 podemos observar la desviación estándar (SD) que presentan ambos modelos en las unidades de los valores dados inicialmente (g de carbón vegetal, mg de Metano). Valores cercanos al 100% de R^2 y R^2 ajustada indican un buen ajuste y mayor confiabilidad y reproducibilidad del modelo. R^2 pred indica qué tan buena predicción tiene el modelo respecto a nuevas observaciones. Por lo tanto, se concluye que el modelo del carbón vegetal cuenta un ajuste de 94.36% y una predicción de 87.31%. Para el modelo del metano, se tiene un ajuste de 62.35% y un pronóstico de 15.3%, valores bajos comparados con el ajuste y pronóstico del modelo de regresión lineal del carbón vegetal.

Tabla 19. Resumen de los modelos estadísticos para las emisiones de metano y carbón vegetal.

Productos	SD	R^2	R^2 ajustada	R^2 pred
Carbón vegetal	2.23607	94.36%	91.89%	87.31%
Metano	200.479	62.35%	45.88%	15.30%

4.4 Elaboración de pellets

Realizadas las variaciones en los parámetros de humedad, carbón vegetal y materia prima se obtuvieron los resultados que se encuentran resumidos en Tabla 20 y Tabla 21. De acuerdo a las especificaciones de pellets producidos a partir de biomasa herbácea, frutal, acuática y mezclas, del estándar internacional ISO 17225-6 para biocombustibles sólidos, el tamaño estándar de un pellet debe estar entre los siguientes rangos:

- Para diámetros (D) entre $6\text{mm} \leq D \leq 10\text{mm}$ con $D \pm 1\text{mm}$, una longitud (L) de $3.15\text{mm} \leq L \leq 40\text{mm}$.
- Para diámetros entre $12\text{mm} \leq D \leq 25\text{mm}$ con $D \pm 1\text{mm}$, una longitud de $3.15\text{mm} \leq L \leq 50\text{mm}$.

El diámetro de la matriz peletizadora que se utilizó en esta investigación es de 8mm, es decir, $6\text{mm} \leq D \leq 10\text{mm}$, por lo que la norma aplicable en este caso es la primera y los pellets deben tener una longitud mayor de 3.15 mm y menor a 40 mm.

En las mezclas que contienen aserrín de pino y carbón vegetal de aserrín de pino se tiene que para ambos tipos de carbón (obtenido a 280°C (A1) y 310°C (A2)), los comportamientos son similares, encontrando que con un 60% en peso de carbón vegetal y 40% de aserrín de pino, con una humedad en la mezcla del 40% se pueden obtener pellets que alcanzaron un tamaño L de 17 mm para el caso de A1, y 13 mm para el caso de A2, lo que cumple con el tamaño estándar atendiendo a la norma ISO 17225-6 ($3.15\text{mm} \leq L \leq 40\text{mm}$).

Tabla 20. Mezclas óptimas para peletizado de aserrín de pino-carbón vegetal de aserrín de pino y tamaño de pellet obtenido.

Mezcla	Cantidad de muestra en mezcla en % peso		Humedad en la mezcla final en % peso	Longitud del pellet
	Carbón vegetal de aserrín de pino	Aserrín de pino		
A1	60	40	40	Pellets que alcanzaron un tamaño de 17 mm
A2	60	40	40	Pellets con un tamaño límite de 13 mm

En la Figura 25 se observan la comparación entre los pellets de la mezcla A1 y A2, donde se muestra mayor homogeneidad para los pellets de la mezcla A1, además de longitudes más grandes y mayor resistencia mecánica. En ambos pellets se logra observar una película plástica, debido a la lignina presente en su estructura molecular, lo que le confiere al pellet un color brillante.



Figura 25 Pellets obtenidos para mezclas de aserrín de pino y carbón vegetal de aserrín de pino

Respecto a los pellets de rastrojo de frutillas y su correspondiente carbón vegetal, la cantidad óptima de carbón vegetal-rastrojo de frutillas puede considerarse en primera instancia como 60-40% respectivamente, con una humedad del 40%, pero dado que los pellets obtenidos tienen tamaños menores a 10 mm, en algunos casos menores al tamaño que exige la norma (3.15 mm), se realizó una segunda ronda con las misma cantidad de muestra en la mezcla pero con una humedad del 55%, donde para la mezcla B1 se obtuvo homogeneidad en la longitud de los pellets, con tamaños de 10 mm, y para el caso B2 se lograron pellets con tamaños de hasta 14 mm. (Tabla 21).

Tabla 21. Mezclas óptimas para peletizado de rastrojo de frutillas-carbón vegetal de rastrojo de frutillas y tamaño de pellet obtenido.

Mezcla	Cantidad de muestra en mezcla, % peso		Humedad en la mezcla final en % peso		Tamaño del pellet	
	Carbón vegetal rastrojo de frutillas	Rastrojo de frutillas	Ronda 1	Ronda 2	Ronda 1	Ronda 2
B1	60	40	40	55	Tamaños entre 6-10 mm	La mayoría de los pellets con tamaños de 10 mm
B2	60	40	40	55	Pellets de tamaño entre 6-10 mm	Se alcanzó el tamaño de 1.4 cm

En la peletización de las mezclas de carbón vegetal y rastrojo frutillas se presentaron varios inconvenientes, ya que las mezclas presentaban roturas y grietas en su superficie, signo de que la humedad en la mezcla no era adecuada, además de que en ocasiones los pellets ya formados llegaron a desintegrarse porque no presentaban resistencia a la manipulación. El color de estos pellets es opaco, a diferencia de los pellets de las mezclas para aserrín de pino, cuyo color es brillante.

Las mezclas de carbón vegetal y rastrojo de frutillas peletizadas se observan en la Figura 26, donde es notorio que la resistencia mecánica de la mezcla B2 y homogeneidad es mayor a la de la mezcla B1, para el caso de la última, se pueden ver algunos pellets desintegrados y de tamaños muy variados y menores a la mezcla B2.



Figura 26. Pellets obtenidos para rastrojo de frutillas y carbón vegetal de rastrojo de frutillas.

Capítulo 5.

CONCLUSIONES

El principal producto obtenido de la gasificación de residuos lignocelulósicos es el carbón vegetal, con porcentajes en peso en un rango del 55% hasta 70%. El metano tiene un porcentaje en peso en los productos del 0.15%, incluso menor que productos no deseados como el CO y CO₂, con porcentajes en peso de 2% y 7% respectivamente.

El modelo de regresión lineal obtenido para los datos de las emisiones de metano no cumple con todos los supuestos para la su validación y tiene ajustes por debajo de 60%, lo cual no es suficiente para considerarse confiable, reproducible y predecible en futuras pruebas. Por otro lado, el modelo de regresión lineal para el carbón vegetal cumple todos los supuestos de validación, además de brindar ajustes por arriba del 87%, por lo que se considera un modelo confiable para la estimación de los parámetros óptimos. En base a esto, podemos decir que todos los efectos principales, temperatura, uso del catalizador y materia prima, además de las interacciones de segundo y tercer orden para el ANOVA del diseño factorial 2³ del carbón vegetal afectan significativamente su producción, a un $\alpha=0.05$, sugiriendo en este experimento que la mayor cantidad de carbón vegetal se obtendrá a base de rastrojo de frutillas sin catalizador y a una temperatura en el reactor de pirólisis de 280°C.

El peletizado para el aserrín de pino se logró con una mezcla de materia prima del 60% carbón vegetal y el 40% aserrín de pino, agregando a esta mezcla humedad en 40%. El rastrojo de frutillas se densifica con una mezcla de 60% carbón vegetal y 40% de rastrojo de frutillas, la misma proporción que el aserrín de pino, pero para este caso la humedad añadida que se requiere aumenta a un 55%. La temperatura a la que se obtiene el carbón vegetal en este caso no influyó en el las mezclas de para peletizar, pero si en la longitud del pellet, siendo para las mezclas de

aserrín de pino y su correspondiente carbón vegetal, el obtenido a 280°C a partir del cual se obtuvo el pellet de mayor longitud (17mm), mientras que, para las mezclas de rastrojo de frutillas, el carbón vegetal que se obtuvo a 310°C permitió los pellets de mayor tamaño en su tipo (14mm).

Capítulo 6.

RECOMENDACIONES

Debido a que la gasificación de aserrín de pino y rastrojo de frutillas para la obtención de metano y biochar (carbón vegetal) es un proceso tardado que requiere al menos de 3 horas de inversión de tiempo para una primera ronda, se sugiere aprovechar el calor residual del reactor, realizando varios lotes por día.

En cuanto al diseño de experimentos, se sugiere explorar otras variables de importancia que afectan la composición de los productos en la gasificación y el carbón vegetal obtenido, tales como el tamaño de partícula de la materia prima que entra al reactor de pirólisis, los tiempos de residencia y probar con otros compuestos lignocelulósicos, también se debe considerar aumentar el número de réplicas para ajustes de los modelos de regresión lineal.

Respecto al proceso de peletizado, se puede investigar sobre aglutinantes diferentes al agua para obtener un densificado que aumente la longitud del pellet manteniendo su resistencia mecánica, sobre todo en el caso de los pellets de carbón vegetal de rastrojo de frutilla.

Es necesario caracterizar los pellets a través de un análisis de proximales, elemental y de poder calorífico para observar su potencial como combustible sólido, observando si existen diferencias significativas entre pellets.

Se recomienda hacer experimentación con los pellets en tareas de cocción y calefacción en dispositivos ya existentes, como gasificadores, quemadores y calefactores.

BIBLIOGRAFÍA

- Abril, A. y Navarro, E. (2012) Etanol a partir de biomasa lignocelulósica, Aleta Ediciones
- A., Jesús (2014). Pirólisis. Recuperado de <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis>
- Anglés M., Roux R. y García E. (2017) Reforma en materia de hidrocarburos. Análisis jurídicos, sociales y ambientales en prospectiva. Segunda parte, capítulo segundo. Ed. Instituto de Investigaciones Jurídicas. México
- Arafat Hossain M et al. (2016) Optimization of process parameters for microwave pyrolysis of oil palm fiber (OPF) for hydrogen and biochar production. Energy Convers Manage <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.046>
- Arteaga, J., Arenas, E., López, D., Sánchez, C., Zapata, Z. (2012) Obtención de biocombustibles producto de la pirolisis rápida de residuos de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. 10(2), 144-151.
- Badii, M.H., A. Guillen & J.L. Abreu. (2016) Renewable energies and energy conservation. *International Journal of Good conscience*. 11(1), 141-155.
- Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and Torrefaction, Practical and design theory* (3era edición) Canadá: Elsevier.
- Berrueta, V. M., Edwards, R., Masera, O. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33, 859
- BCS, 2019. Recuperado de: <https://clusterbcs.com/>
- CONAFOR, 2019. Programa Anual de trabajo, México
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2019). *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*.

Escalante Rebolledo, A., G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco y J. D. Etchevers Barra. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.

Falcao, N. (2012). Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio. Do *Globo Natureza*, com informações do *Globo Rural* (ed.). Recuperado de: <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-deindio.html>

Ferrari L. (2020) Diagnóstico de propuestas para un futuro ambiental sustentable en México. Webinar. Complejo Nacional de Biogás. Recuperado de: <https://www.cnbiogas.mx/webinar-gratuito>

Guo, M., W. Song y J. Buhain (2014), “Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42,712-725.

Hansson, A., Haikola, S., Fridahl, M., Yanda, P., Mabhuye, E. y Pauline, N. (2020) Biochar as multi-purpose sustainable technology: experiences from projects in Tanzania. *Environment, Development and Sustainability*

INTERNATIONAL STANDARD ISO 17225-6. Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 6: Graded non-woody pellets

Kim YM, Kim S, Han TU, Park YK. (2014) Pyrolysis reaction characteristics of Korean pine (*Pinus Koraiensis*) nut shell. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 110, 435–441.

Marqués, S. (2010). Valorización de diferentes cultivos lignocelulósicos para la fabricación de pasta de papel: Caracterización química, modificación estructural de sus constituyentes orgánicos, durante los procesos de cocción y blanqueo y aplicaciones biotecnológicas. Tesis doctoral. (Facultad de Ciencias químicas, Universidad de Sevilla.)

Masera, O; Díaz, R; Berrueta, V. (2011). Estufas de leña: Cuaderno temático no. 3. México, Red mexicana de bioenergía, A.C.

McKendry, P. (2002). “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass”. *Bioresource technology*, 83(37)

MINITAB (2019). Modelado estadístico. ANOVA. Temas de apoyo. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/basics/understanding-test-for-equal-variances/#what-is-test-for-equal-variances>

Montgomery, D. y Runger, C. (2003). Probabilidad y estadística aplicada a la Ingeniería. Segunda edición. Editorial Limusa.

Nogués, F., Galindo, D. (2010). Energía de la biomasa (Volumen 1). Zaragoza: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza.

Organización Meteorológica Mundial (2019). WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN #15: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018.

Pengmei L., Zhenhong, Y., Chuangzhi, Longlong, M., Yong, C. , Noritatsu, T. (2004) Bio-syngas production from biomass catalytic gasification. Elsevier: Energy, conversion and management. 48, 1132-1139.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Septuagésimo período de sesiones. Nueva York

PRODESEN, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, 2018, México

REMBIO, Red Mexicana de Bioenergía, Biocombustibles Sólidos, 2020, México.

Ríos Badrán, I. (2017). Producción de pellets de cascarilla de arroz con máximo contenido energético. Tesis de Maestría. Facultad de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.

Ríos, I., Santos, J. y Gutiérrez, C. (2017) Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global. 68(4).

Ruiz García, V. M., Edwards, R. D., Ghasemian, M., y col. (2018). Fugitive emissions and health implications of plancha-type stoves. Environmental science & technology, 52, 10848

Ruíz, J. A. (2013). Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa. Tesis doctoral, Universidad de la Rioja, Logroño, La Rioja (España). Recuperado de: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10100

Salinas E. y Gasca V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, (157),75-82. Recuperado en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=325/32512739009>

SEMARNAT (2016). Anuario estadístico de la producción forestal

SENER, Balance Nacional de Energía, 2016, México

SENER, Balance Nacional de Energía, 2017, México

SENER, Balance Nacional de Energía, 2018, México

SIAP, 2018. Expectativas agroalimentarias 2019, México

Soto, G., Núñez, M. (2008). *Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de Pinus radiata (D. Don), como material aglomerante*. Revista Maderas, Ciencia y Tecnología. Universidad de Talca, Chile, 10(2), p 10

Toledo, G. (2014). Síntesis de catalizadores de Ni/ γ Al₂O₃ y su aplicación en la gasificación de residuos lignocelulósicos derivados del pino. Tesis de Maestría. (División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).

UNE-EN ISO 18134-2:2017. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa: Parte 2

Valdés de León, O. (2005) Gas de síntesis como combustible para la generación de energía. Tesis de Maestría. División de Ingeniería y Arquitectura. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (México)

Woods, W. I. (2004). Development of anthrosol research. pp. 1-14. In: J. Lehman, D. C. Kern, B. Glaser, and W. I. Woods (ed.). *Amazonian Dark Earths*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands

Xianjun, X., Fangyu, F., Wen, J. (2018) Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures. *R. Soc. open sci.* 5172346

Yan W, Chen ZH, Sheng KC. (2015) Carbonization temperature and time improving quality of charcoal briquettes. Trans. CSAE 31, 245–249.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Rango de temperatura para la gasificación

En la Figura 27 se presenta un análisis termogravimétrico para el aserrín de pino, donde se señalan en rojo los puntos de degradación importantes de la materia prima, que en este caso son 280°C, 340°C y 380°C, siendo este último punto donde ya no hay nada para degradar, por lo que el rango queda reducido a 280°C-340°C. Debido a que el reactor de pirólisis del GASIFICADOR EMII-02 opera bajo presión, se deben elegir temperaturas menores para la experimentación. El manual del reactor gasificador sugiere temperaturas de 270°C-280°C, por lo que se elegirá como temperatura en el nivel bajo 280°C y un aumento de 30°C para la temperatura en el nivel alto; 310°C, para que el reactor pueda operar de manera segura sin sobrepasar la presión que tolera de 10 kg/cm².

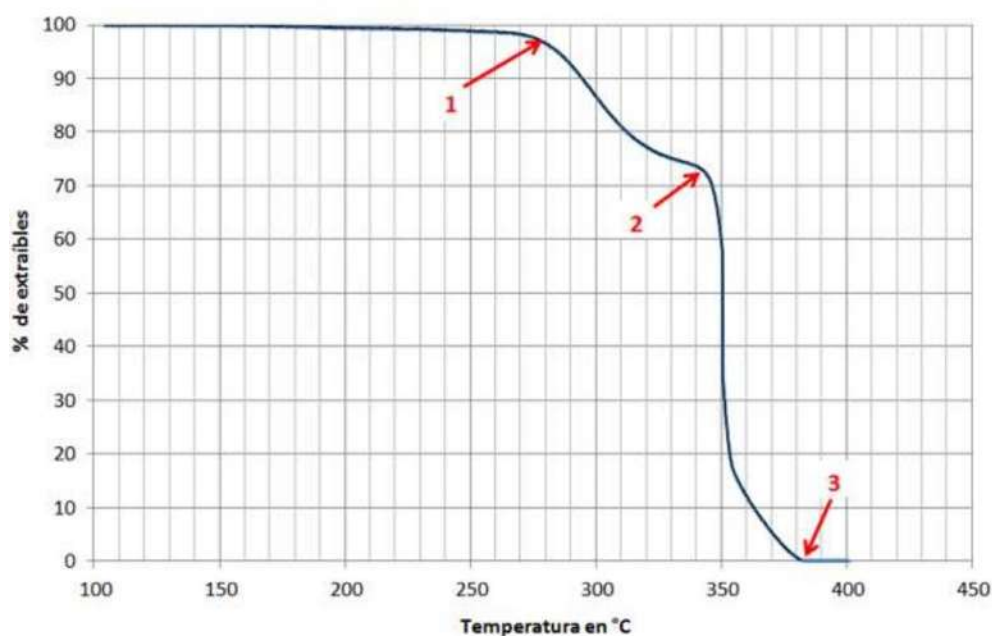


Figura 27. Curva TGA para el aserrín de pino (Toledo, 2014)

APÉNDICE B. Composición del gas producto de la gasificación

En el Cromatógrafo Analizador de Gases *Young Li 3600*, además del metano, se detectaron otros cuatro hidrocarburos de cadena corta: etano, etileno, propano y butano. En la Figura 28 se logra apreciar el cromatógrafo para la prueba piloto de gasificación de aserrín de pino a 280°C con catalizador.

Los 5 picos mostrados en la Figura 28 corresponden a detecciones de los siguientes compuestos en su orden respectivo: metano, etano, etileno, propano y butano. Los picos pequeños, apenas detectables, corresponden a concentraciones despreciables de otros compuestos.

Además, se midieron concentraciones de CO y CO₂, con sistemas de monitoreo de emisiones, LEMS.

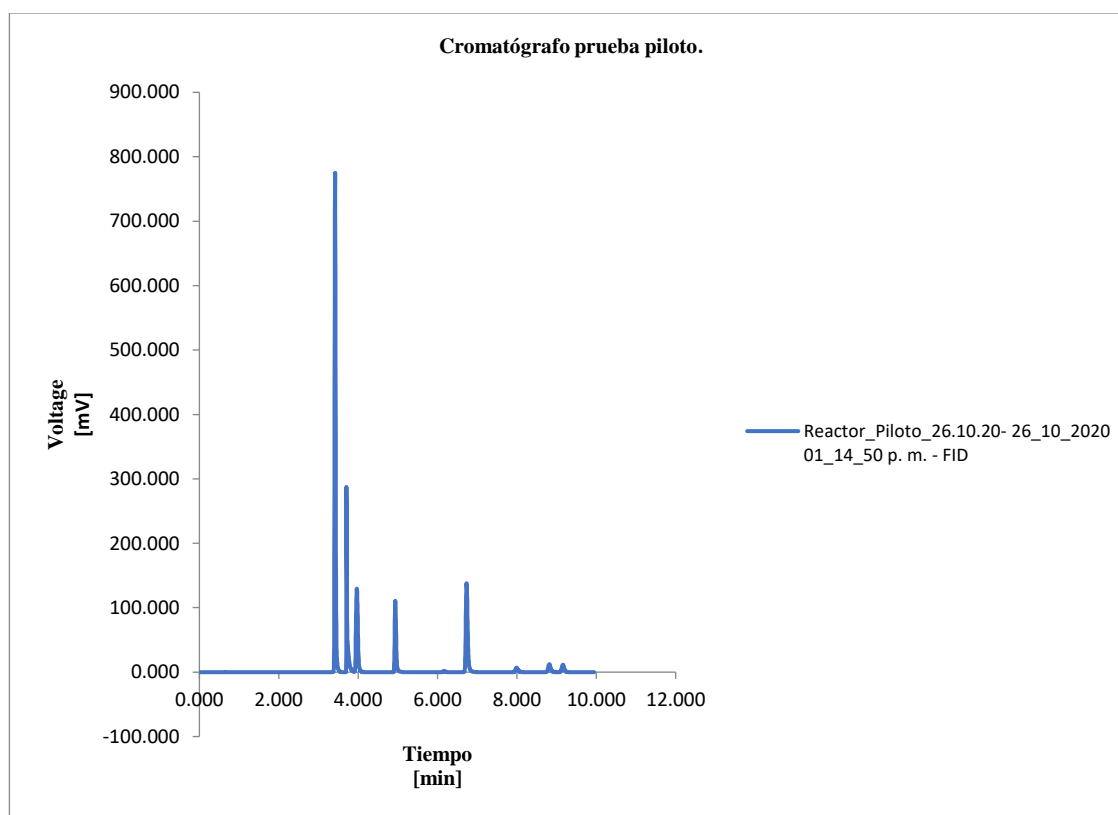


Figura 28. Cromatógrafo de la prueba piloto para Aserrín a 280°C con catalizador. Identificación de compuestos gaseosos en la gasificación.

Tabla 22. Emisiones de compuestos medidos en el cromatógrafo y LEMS

Prueba	CAT	T reactor pirólisis $\pm 5(^{\circ}\text{C})$	Réplica	Materia prima	CO ₂ (g)	CO (g)	VOC's (g)	Etano (g)	Etileno (g)	Propano (g)	Butano (g)	
1	SI	280	1	Aserrín de pino	15.150	1.416	0.164	0.00301	0.00544	0.00369	0.0041	
2			2		6.938	3.683	0.923	0.01102	0.00471	0.00546	0.0057	
3			3		13.253	2.332	0.272	0.00343	0.00201	0.00677	0.0029	
4			1		19.905	13.331	3.359	0.04408	0.03626	0.01714	0.0186	
5			2		14.930	17.268	1.125	0.03563	0.03464	0.01877	0.0539	
6			3		13.408	10.387	2.318	0.01578	0.00542	0.01712	0.0238	
7		NO	310		1	4.074	1.782	0.164	0.00601	0.00267	0.00320	0.0045
8					2	12.513	2.839	0.248	0.00751	0.00491	0.00416	0.0043
9					3	3.269	2.090	0.306	0.00363	0.00244	0.00365	0.0041
10					1	12.937	5.182	0.637	0.01353	0.01181	0.00943	0.0093
11					2	10.722	5.480	0.527	0.01461	0.01624	0.01225	0.0148
12					3	9.737	4.705	1.097	0.01461	0.01490	0.00866	0.0195
13	SI	280	1	Rastrojo de frutillas	21.157	5.250	1.331	0.06168	0.04419	0.02559	0.0463	
14			2		32.189	2.289	0.672	0.00754	0.01063	0.01177	0.0065	
15			3		20.609	1.012	0.583	0.01913	0.01105	0.01019	0.0061	
16			1		16.537	1.400	0.557	0.00377	0.00459	0.00521	0.0036	
17			2		15.330	1.528	0.880	0.00545	0.00713	0.00579	0.0027	
18			3		15.496	1.388	0.863	0.00977	0.01372	0.00556	0.0049	
19		NO	310		1	23.608	2.376	1.385	0.02683	0.01446	0.00916	0.0106
20					2	18.553	2.250	1.175	0.00807	0.00545	0.00933	0.0089
21					3	21.256	1.807	1.165	0.02051	0.02380	0.00434	0.0120
22					1	10.160	1.863	0.910	0.02468	0.03262	0.01547	0.0056
23					2	11.102	1.622	0.825	0.01178	0.01361	0.01538	0.0095
24					3	14.293	2.051	0.988	0.01561	0.01931	0.00755	0.0039

Nota: En esta tabla de emisiones no se incluyen las emisiones de metano (Tabla 14)

En la Tabla 22 se concentran los resultados de las emisiones de los compuestos, además del metano, presentes en el gas de la gasificación. El CO₂ comprende la mayoría de esas emisiones, con un promedio de emisiones de 14.88 ± 3.99 g, seguido del CO, con una media de 3.97 ± 4.09 g. El propano es el gas con proporción minoritaria, con un promedio de 0.0098 ± 0.0058 g.

APÉNDICE C. Cálculos para la humedad de la materia prima.

Tabla 23 Humedad en base húmeda del aserrín de pino.

Peso inicial de la muestra (g)	Peso final de la muestra (g)	Humedad (g)	Hbh promedio	Desviación Estándar
1.03367	0.93479	0.095659156		
1.03028	0.93561	0.091887642	0.091791454	0.003916683
1.01927	0.92975	0.087827563		

Tabla 24 Humedad en base húmeda para rastrojo de frutillas

Peso inicial de la muestra (g)	Peso final de la muestra (g)	Humedad (g)	Hbh promedio	Desviación Estándar
1.02259	0.91935	0.100959329		
1.00672	0.9067	0.099352352	0.099425196	0.001499039
1.00241	0.90421	0.097963907		