

PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE RESIDUOS BIOMÁSICOS

Production of briquettes from biomass waste

María de los Ángeles ÁLVAREZ-AYALA¹, Marco Antonio MARTÍNEZ-CINCO¹,
Claudia GUTIERREZ-ANTONIO² y Víctor Manuel RUIZ-GARCÍA^{3*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 58040 Michoacán, México.

² Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, 76010 Querétaro, México.

³ Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Morelia, 58190 Michoacán, México.

*Autor para correspondencia: vruiz@cieco.unam.mx

(Recibido: julio 2023; aceptado: abril 2024)

Palabras clave: reactor, pirólisis, aserrín de pino, poda de arándano, gases de efecto invernadero, biocombustibles.

RESUMEN

La innovación en el aprovechamiento de energías renovables es un reto mundial, dado el agotamiento de recursos fósiles y el cambio climático. La biomasa es un bioenergético clave y versátil, utilizándose desde procesos simples de combustión hasta en procesos complejos como la torrefacción, de la cual se obtienen principalmente metano (CH₄), syngas y biomasa torrefactada, esta última con características que facilitan su uso como combustible. En este estudio se aprovechan residuos biomásicos de aserrín de pino (ADP) y poda de arándano (PDA), mediante procesos de torrefacción para obtener biomasa torrefactada (BT) para elaborar gránulos. Para ello se realizó un diseño experimental de tres factores y dos niveles: temperatura en la torrefacción (280 y 310 °C), catalizador (con catalizador y sin catalizador en el gas producido), y tipo de biomasa (ADP y PDA), aplicando un análisis de varianza para verificar la importancia de los factores. Con la BT se elaboraron briquetas en mezclas de BT-ADP y BT-PDA, utilizando como aglutinante agua, caracterizándolos a través del poder calorífico, humedad y proximales. Los resultados muestran que la BT presenta rendimientos alrededor del 55-70 %, con una conversión máxima cuando se utiliza ADP a 280 °C, sin catalizador. El CH₄ como producto secundario tiene rendimientos de 0.38 %, obtenido con ADP a 310 °C, con catalizador. La formación de gránulos se posibilitó en las mezclas de 60 % BT-40 % ADP, con 40 % en peso de agua y 60 % BT-40 % PDA, con agua al 55 % en peso.

Key words: reactor, pyrolysis, pine sawdust, blueberry pruning, greenhouse gases, biofuels.

ABSTRACT

Innovating in the use of renewable energy is a challenge facing the world, given the depletion of fossil resources and climate change. Biomass is a versatile key bioenergy, being used in simple combustion processes, up to complex pyrolysis processes such as torrefaction, where products such as methane (CH₄), syngas and torrefacted biomass are obtained, the latter with characteristics that facilitate its use as fuel. In this study, biomass residues of pine sawdust (ADP) and blueberry pruning (PDA) were used, through torrefaction processes to obtain torrefacted biomass (BT) as the main product to make briquettes. This work is based on an experimental design of 3 factors and 2 levels, which are: torrefaction temperature at 280 and 310 °C, catalyst or without catalyst in the produced gas, and the type of biomass:

ADP and PDA, applying an analysis of variance to verify the importance of the factors. With BT, briquettes were made in mixtures of BT-ADP and BT-PDA, using water as a binder, characterizing them through their humidity, proximals, and calorific value. The results showed that BT presents yields around 55-70%, with a maximum conversion when ADP is used at 280 °C, without catalyst. The CH₄ as a secondary product has a yield of 0.38%, obtained with ADP at 310 °C, with catalyst. briquettes synthesis was possible in the mixtures of 60% BT-40% ADP, with 40% by weight of water and 60% BT-40% PDA, with 55% by weight of water.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la matriz energética mundial depende de los combustibles fósiles. En 2004 se alcanzó el pico del petróleo, y a partir de ese momento se comenzó a extraer la energía más cara y de difícil acceso (Ferrari 2020). Debido a eso, existe la necesidad de transitar a energías alternativas, en donde la biomasa tiene un rol trascendental. A nivel mundial, el 60 % de las energías renovables la constituye la biomasa (como biocombustibles tradicionales y modernos) y, para el caso de México, la leña representa aproximadamente el 68 % de estos biocombustibles (SENER 2022).

Por otro lado, los residuos biomásicos, que provienen de prácticas agroforestales, se han convertido en un problema ambiental global, debido a su ineficiente disposición y a su creciente aumento (Bettles et al. 2021); como es el caso del aserrín y viruta de la industria maderera y las podas del sector agrícola. Conforme aumentan los residuos biomásicos, se incrementa el costo de eliminación, lo que resalta la necesidad de aplicaciones sostenibles para convertir esta materia en productos de valor agregado (Gupta et al. 2022).

La agricultura y la silvicultura son las principales fuentes de residuos biomásicos y pueden utilizarse como fuentes para la producción de bioenergía (Kumar et al. 2023). Para el caso de México, la industria del aserrín procesa el 70 % de la producción forestal, generando anualmente alrededor de 2.8 millones de m³ de desechos, principalmente aserrín, virutas y cortezas (Fregoso-Madueño et al. 2017). En el caso de los residuos agrícolas, en el periodo 2008-2011, se produjeron 37.5 millones de toneladas, ocupando Michoacán el 5to lugar en producción de rastrojos con 2.4 millones de toneladas (Reyes-Muro et al. 2013).

Países como China y Estados Unidos de América lideran la investigación en cuanto al aprovechamiento de residuos agroforestales para su transformación en bioenergía (Muñoz-Rodríguez et al. 2022). En México, existen estudios que evalúan de manera aislada y exclusiva la caracterización de biomasa con potencial para ser transformada en biocombustibles (Parascanu

et al. 2017, Rutiaga-Quiñones et al. 2020); pero hay muy pocos estudios que integren la caracterización de residuos agroforestales con usos locales, los pretratamientos que se dan a la biomasa previos a los procesos de producción de biocombustibles y los subproductos que se pueden obtener. Incluso, hay procesos que son capaces de producir biocombustibles en diferentes fases: sólidos, líquidos y gaseosos (Parascanu et al. 2017).

La torrefacción, también llamada pirólisis media, consiste en un tratamiento termoquímico aplicado a la biomasa en una atmósfera inerte, a temperaturas que rondan los 200-300 °C (Pahla et al. 2018), con tiempos de residencia menores a una hora, donde se obtienen un producto sólido y gases como el CH₄. La granulación, por otro lado, es proceso mecánico que consiste en densificar la materia en forma de briquetas, ambos tratamientos permiten mejorar las características de la biomasa para su uso energético (Sarker et al. 2022). La transformación de residuos en biocombustibles como las briquetas y el metano, permite ampliar las opciones energéticas de países emergentes como México, que cuenta con un potencial biomásico importante (Tauro et al. 2018).

Los biocombustibles obtenidos de la biomasa residual, al ser sometida a pretratamientos, se consideran una energía limpia por cumplir con un ciclo de carbono completo; por lo tanto, son una alternativa para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (PNUD 2015), principalmente el objetivo de acceso a la energía limpia y mitigación al cambio climático (Objetivos 7 y 13, respectivamente). Estos biocombustibles pueden ser utilizados en tecnologías existentes como gasificadores y estufas de gas natural, lo que puede facilitar su adopción en el largo plazo (Ruiz-Mercado et al. 2011). Las briquetas tienen aplicaciones en el sector residencial, comercial e industrial para la generación de calor y electricidad, lo que permitirá innovar al dar alternativas energéticas para los diferentes sectores y procesos.

El objetivo de esta investigación es aprovechar residuos biomásicos que son una problemática en la región, así como desarrollar el proceso de obtención de biocombustibles como briquetas de biomasa torrefactada

y metano como biocombustible secundario mediante el uso de un reactor pirolítico, para lograr alternativas energéticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los residuos biomásicos

Se utilizaron como materias primas el aserrín de pino (*Pinus* sp.) y la poda de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), provenientes de la industria maderera y agrícola, típicas del estado Michoacán. Los residuos tuvieron un pretratamiento para estandarizar el diámetro de partícula mediante una trituradora de ramas y hojas (Bomeri, BM11Mix, México), y un tamiz con malla cédula 18 (Tyler, RO-TAP RX 29, EUA), para obtener partículas con tamaño igual o menor a 1 mm. Se determinó la humedad de las materias primas a través de la norma UNE EN ISO 18134-2:2017 (ISO 2017b), y fue realizado un análisis elemental en porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y azufre (S) usando el método Dumas (Ruiz-García et al. 2022) en un analizador elemental (Thermo-Scientific, Flash 2000, Waltham, EUA).

Torrefacción de la biomasa y medición de emisiones

Para la torrefacción de biomasa de aserrín de pino y de poda de arándano se utilizó el reactor de pirólisis

EMII-02 (**Fig 1**). El equipo consta de: (1) un reactor de pirólisis acoplado a (2) un reactor catalítico cargado con gamma-alúmina impregnado con níquel al 10 % como catalizador, una serie de válvulas (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) que permiten medir y manipular la presión en el equipo, tomar muestras, almacenar y quemar el gas. La temperatura se modifica por medio de un panel de sensores en los reactores catalítico y de pirólisis con un termopar tipo K, que posee un rango de medición de 0-400 °C y una precisión de ± 1 °C. La humedad de la biomasa que ingresó al reactor fue menor al 12 % (base húmeda) para homogeneidad en el control del proceso.

Para la medición de gases durante el proceso de torrefacción, el reactor de pirólisis se colocó bajo una campana de recolección de gases, que cuenta con una tubería para permitir el muestreo de gases y aerosoles (Ruiz-García y Masera 2018). La salida de gases del reactor de pirólisis fue acoplada a la tubería a través de un tubo de acero inoxidable de 10 mm de diámetro. El producto secundario obtenido, el metano, además de otros hidrocarburos de cadena corta como etileno, acetileno, propano, propileno, butano y propino, fueron medidos mediante un cromatógrafo analizador de gases (Young Li Instrument 6500, Corea); éste cuenta con un detector de ionización de flama (FID, por sus siglas en inglés) que utiliza para su funcionamiento aire seco y nitrógeno, con cuatro estándares diferentes: nitrógeno a punto cero,

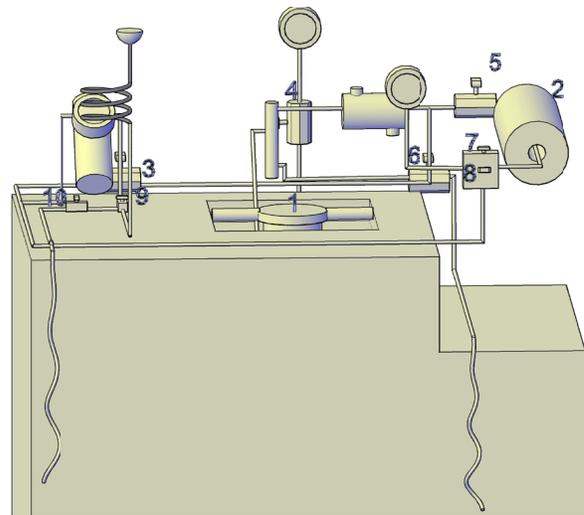
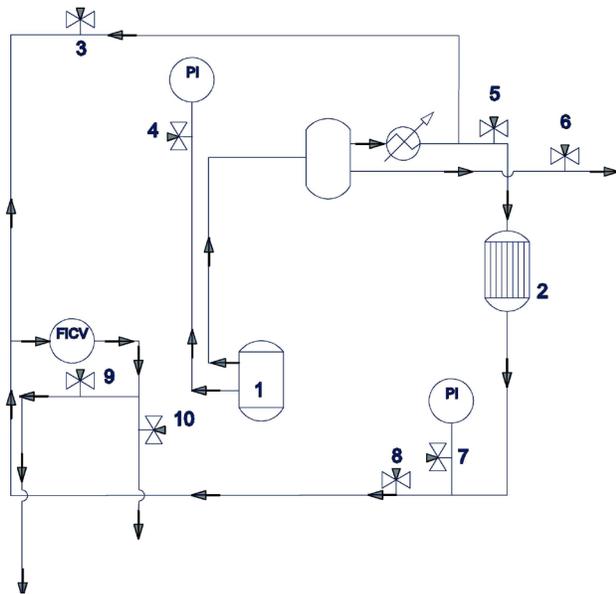


Fig. 1. Diagrama de bloques del reactor de pirólisis EMI-02 (izquierda), Diagrama del reactor de pirólisis EMI-02 (Derecha).
Elaboración propia.

15 ppm, 100 ppm y 200 ppm para hidrocarburos (Ruiz-García et al. 2021).

Adicionalmente, fue medido 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 y Maserá 2018).

Diseño de experimentos y análisis estadístico

El enfoque de este estudio es obtener biomasa torrefactada y metano como producto secundario para diversas aplicaciones, así como estudiar los factores que afectan el porcentaje de conversión en el reactor de pirólisis. Por ello, se estudiaron tres variables en el proceso de conversión de la biomasa: temperatura, catalizador y materia prima. La selección de temperaturas a evaluar se realizó tomando en consideración diagramas de análisis termogravimétricos (TGA, por sus siglas en inglés), los cuales expresan el perfil de pérdida de volátiles vs. temperatura (Toledo 2014, Xu et al. 2020). Las temperaturas elegidas están en función del primer punto de degradación importante, representado por la primera curva observada en el diagrama del aserrín de pino, la cual se encuentra en los 280 °C. El segundo punto de degradación se estableció considerando que la pirólisis es considerada un proceso de torrefacción cuando se somete a temperaturas que rondan los 200-300 °C; para este caso de estudio la temperatura corresponde a 310 °C, rondando la temperatura de torrefacción y dejando un margen de 30 °C entre temperaturas para análisis y sin superar el umbral de la pirólisis lenta que inicia en los 400 °C (Basu 2010).

A la salida del reactor de pirólisis, el gas fue enviado hacia el reactor catalítico o a la salida del reactor, entendiéndose dos opciones: usar el catalizador o no usarlo. Se realizó un diseño de experimentos factorial para analizar el comportamiento de las variables: temperatura, catalizador y materia prima. Estos tres factores se observaron en dos niveles, para la temperatura, los niveles de 280 y 310 °C se basan en el TGA descrito previamente (Toledo 2014). Para el catalizador, los niveles representan el uso y no uso del catalizador. En el caso de la materia prima, los niveles son el aserrín de pino y la poda de arándano. Estos últimos dos factores, catalizador y materia prima, son de tipo

cualitativo. En el **cuadro I**, se describe la matriz de experimentos.

La combinación de factores y niveles arroja un total de ocho experimentos. Se realizaron tres réplicas por experimento, cuyos resultados fueron estudiados en este trabajo a través de un análisis de varianza (ANOVA); para ello se empleó la herramienta estadística MINITAB, en los cuales es posible comparar las medias de las variables de respuesta a estudiar en los diferentes niveles de los factores.

Elaboración de briquetas

Se utilizó una máquina compactadora modelo KL 120 B, para elaborar briquetas, la cual requiere una carga mínima de 1 kg de materia prima de alimentación, con matriz de 120 mm y puede producir hasta 60 kg/h de briquetas de 8 mm de diámetro. Para encontrar el porcentaje de las mezclas realizadas cuyas propiedades fueran superiores, tales como buena compactación, estructura, homogeneidad y menor agrietamiento en las briquetas, se realizaron variaciones en las mezclas de biomasa torrefactada (BT)-biomasa natural (BN), yendo desde un 90 % BT-10 % BN en peso y disminuyendo para cada ensayo el porcentaje de biomasa torrefactada utilizada. En el caso del aglutinante se utilizó agua, variando la proporción agregada de agua en peso en relación con el peso de la mezcla, desde un 10 hasta un 50 %.

En el **cuadro II**, se muestra la planeación de mezclas de los cuatro tipos de BT obtenidos y las dos materias primas.

Posteriormente, las briquetas fueron caracterizados mediante un análisis de humedad, proximales (cenizas, volátiles y carbono fijo) y poder calorífico superior. La humedad se calculó de acuerdo con el método que establece la norma UNE EN ISO 18134-2:2017 (ISO 2017b). El porcentaje de cenizas fue obtenido mediante el método descrito en la norma UNE-EN ISO 18122:2015 (ISO 2015a). Para el material volátil se siguió la norma UNE EN ISO 18123:2015 (ISO 2015b), finalmente, el carbono fijo es el porcentaje restante una vez que se descuentan los volátiles y las cenizas. Para conocer el poder calorífico superior se utilizó el calorímetro 6100 Parr, atendiendo la norma ISO 18125:2017 (ISO 2017a).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización

La biomasa natural de ADP tiene una humedad base húmeda (Hbh) de $9.2 \pm 0.4\%$, mientras que para la PDA, la Hbh es de $9.9 \pm 0.2\%$, apropiada para el rango de operación sugerido para el reactor de pirólisis, $<12\%$ (Toledo, 2014).

CUADRO I. MATRIZ DE EXPERIMENTOS PARA EL ANÁLISIS DEL EFECTO CONJUNTO DE LA TEMPERATURA Y EL CATALIZADOR EN LA OBTENCIÓN DE METANO Y BIOMASA TORREFACTADA.

Factores		
Temperatura (°C)	Catalizador	Materia prima
280	No	Aserrín de pino (A)
310	Sí	Poda de arándano (B)

Experimento	Matriz de experimentos		
	Temperatura	Catalizador	Materia prima
1	280	No	A
2	310	No	A
3	280	Sí	A
4	310	Sí	A
5	280	No	B
6	310	No	B
7	280	Sí	B
8	310	Sí	B

CUADRO II. PLANEACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS.

Materia prima	Biomasa torrefactada	Mezcla
Aserrín de pino (ADP)	(1) BT de aserrín de pino (280 °C)	A1
	(2) BT de aserrín de pino (310 °C)	A2
Poda de arándano (PDA)	(1) BT de poda de arándano (280 °C)	B1
	(2) BT de poda de arándano (310 °C)	B2

Nota: Las biomásas fueron torrefactadas previo a la elaboración de briquetas. BT se refiere a biomasa torrefactada.

El **cuadro III** muestra el análisis elemental de las materias primas donde se observa que el elemento con mayor presencia en la composición es el carbono, como suele suceder en las estructuras moleculares de la materia orgánica. En este caso, el ADP y PDA presentan porcentajes cercanos al 47 %. Para el caso de biomasa proveniente de ADP, Xu et al. (2020) muestran porcentajes de 50 % para el carbono (C), 6 % para el hidrógeno (H), 0.23 % de nitrógeno (N) y 0 % para el azufre (S), que son valores similares a los obtenidos en este estudio. Para residuos agrícolas, Noushabadi et al. (2021) consideran un compilado de datos para diferentes residuos agrícolas, donde el contenido de C se encuentra entre 26.6-56 %, en el caso del

H, 1.4-7.2 %, 0-5.1 % para N y 0-1.09 % para S. Al comparar estos datos con los obtenidos, encontramos que todos los valores de la PDA se encuentran dentro del margen de porcentaje de los distintos tipos de residuos que consideran Noushabadi et al. (2021), incluso los residuos del ADP.

Torrefacción y producción de metano

Para la producción de metano y BT, cada prueba realizada tuvo un tiempo de residencia de una hora, donde los gases muestreados se monitorearon en tiempo real.

Los productos de la torrefacción que se observan en el **cuadro IV**, para las diversas condiciones seleccionadas

CUADRO III. ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS MATERIAS PRIMAS.

Materia prima	N %	C %	H %	S %
Aserrín de pino	0.18 ± 0.01	47.37 ± 0.01	6.19 ± 0.02	ND
Poda arándano	1.20 ± 0.07	47.26 ± 0.20	6.14 ± 0.19	ND

Nota: Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar para n=2. ND: representa mediciones por debajo del límite de detección (0.001 %).

CUADRO IV. BIOMASA TORREFACTADA (BT) Y EMISIONES DE METANO Y SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN.

Materia prima	Temperatura (°C)	Uso catalizador	BT (g)	Conversión (% masa BT)	CH ₄ (mg)	Conversión (% masa CH ₄)	CO ₂ (g)	Conversión (% masa CO ₂)	CO (g)	Conversión (% masa CO)
Aserrín de pino	280	Sí	134.5 ± 0.08	67.25	150.23 ± 24.81	0.08	11.78 ± 4.29	5.89	2.48 ± 1.14	1.24
			112 ± 0.38		769.6 ± 344.43		16.08 ± 3.39		13.66 ± 3.39	
	310	Sí	137.33 ± 2.88	68.67	96.03 ± 63.82	0.04	6.62 ± 5.12	3.31	2.24 ± 0.54	1.12
			123.67 ± 78.45		236.83 ± 78.45		11.13 ± 1.64		5.56 ± 0.39	
Poda de arándano	280	Sí	131.67 ± 3.78	65.83	484.17 ± 426.31	0.24	24.65 ± 6.53	2.33	2.85 ± 2.17	1.43
			129 ± 0.00		162.07 ± 13.05		15.79 ± 0.65		1.44 ± 0.08	
	310	Sí	133.66 ± 1.52	66.83	303.33 ± 18.12	0.15	21.14 ± 2.53	10.56	2.14 ± 0.29	1.07
			130.33 ± 1.15		183.5 ± 99.39		11.85 ± 2.17		5.93 ± 0.22	
310	No	130.33 ± 1.15	65.16	183.5 ± 99.39	0.09	11.85 ± 2.17	5.93	1.85 ± 0.22	0.92	

Nota: Los valores reportados son el promedio de tres repeticiones por experimento. La desviación estándar para n=3 queda indicada mediante el símbolo ±

(temperatura y uso del catalizador), la producción BT, así como el metano, CO y CO₂ en masa (g) obtenida del producto gaseoso para cada experimento.

Al comparar los valores mínimos y máximos de los productos, se distingue una relación inversamente proporcional entre el metano y la biomasa torrefactada.

Para el caso de la conversión de la biomasa a BT, se observa que la cantidad de producto obtenido disminuye para una misma prueba al pasar de los 280 a 310 °C. Los porcentajes de conversión que van desde 56 hasta 67 %, son equiparables a los obtenidos por Talero et al. (2019), los cuales rondan el 65 y 72 % para diferentes residuos de palma aceitera.

CUADRO V. RESULTADOS DEL ANOVA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA TORREFACTADA.

Fuente	Grados de libertad	Ajuste SS	Ajuste MS	F-valor	P-valor
Temperatura (°C)	1	661.5	661.5	132.3	0
Uso del catalizador	1	121.5	121.5	24.3	0
Materia prima	1	112.67	112.667	22.53	0
Temperatura (°C)*Uso del catalizador	1	24	24	4.8	0.044
Temperatura (°C)*Materia prima	1	337.5	337.5	67.5	0
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	5		
Total	23	1418			

Nota: Para este modelo estadístico se tuvo un ajuste de R^2 del 94.36%, con un R^2 de predicción de nuevas observaciones de 87.31 %. Los asteriscos representan la interacción entre factores.

Dentro de los productos gaseosos, el CO_2 es el producto mayoritario, seguido del CO y finalmente CH_4 , similar a los resultados que presentan Chen et al. (2018). Para los productos de la torrefacción de ADP, la temperatura mayor promueve la producción de éstos. La PDA tiene el efecto contrario. Para los experimentos donde se utilizó el catalizador, aumentó la producción de metano, así como de los otros gases monitoreados, ya que como menciona Toledo (2014), el uso de catalizadores como el níquel soportado en gamma-alúmina, promueve la formación de CH_4 , entre otros gases.

ANOVA para el diseño factorial general

Para el ANOVA aplicado al diseño factorial para la biomasa torrefactada y el metano fueron utilizadas las ecuaciones de Montgomery y Runger (2003), para una confiabilidad del 95 %, es decir P-valor <0.05 .

El **cuadro V** presenta los resultados del ANOVA para la biomasa torrefactada. El P-valor permite concluir 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 $\alpha = 0.05$, cumpliendo con los supuestos de varianza constante, independencia y normalidad de los residuos. De los ensayos realizados, el de la combinación aserrín de

pino, sin catalizador y 280 °C fue el que obtuvo la mayor producción de biomasa torrefactada.

Por otro lado, el ANOVA para el subproducto CH_4 que se puede ver en el **cuadro VI**, permitió identificar que únicamente el catalizador, así como la interacción de temperatura y materia prima tiene un efecto significativo en la producción de metano, que es aumentar su producción, de acuerdo con los datos obtenidos. El experimento que mayor metano produjo fue aquel donde se utilizó ADP como base a 310 °C y con catalizador.

Elaboración de briquetas

La elaboración de briquetas de biomasa torrefactada en mezclas con las materias primas aserrín de pino y poda de arándano fue posible en proporciones de 60 % BT-40 % materia prima, con agua como aglutinante que representa el 40 % en peso; en el caso del ADP, para el caso de la PDA, 55 %, siendo las briquetas de BT 280 °C-ADP las que alcanzaron mayor longitud (17 mm) y resistencia a la manipulación. Para el caso de la PDA, la mezcla con mayor longitud y estructura compacta fue BT 310 °C-PDA, con 14 mm (**Fig. 2**).

Dentro de los estudios de caracterización que se muestran en el **cuadro VII**, con porcentajes en peso, se logra observar que la humedad para las briquetas de BT-ADP (A1 y A2) ronda el 5.8 %, su

CUADRO VI. RESULTADOS DEL ANOVA PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO.

Fuente	Grados de libertad	Ajuste SS	Ajuste MS	F-valor	P-valor
Temperatura (°C)	1	0.0379	0.0379	0.94	0.346
Uso del catalizador	1	0.2089	0.2088	5.20	0.037
Materia prima	1	0.0053	0.0053	0.13	0.720
Temperatura (°C)*Uso del catalizador	1	0.0286	0.0286	0.71	0.411
Temperatura (°C)*Materia prima	1	0.5418	0.5418	13.48	0.002
Uso del catalizador*Materia prima	1	0.0685	0.0685	1.71	0.210
Temperatura (°C)*Uso del catalizador*Materia prima	1	0.17383	0.17382	4.32	0.054
Error	16	0.6431	0.0401		
Total	23	1.7083			

Nota: Para este modelo estadístico se tuvo un ajuste de R^2 del 68.35%, con un R^2 de predicción de nuevas.

materia volátil representa el 69 %; para el caso de cenizas se alcanza un valor entre el 4.15 y 5 % y el carbono fijo un 25 % del total. Para este tipo de briquetas, el poder calorífico superior tiene su máximo en las briquetas con BT obtenida a 310 °C (A2) con un valor de 22.99 MJ/kg, mientras que para el BT obtenido a 280 °C (A1), este valor se reduce a 21.9 MJ/kg; estos resultados son equiparables a los resultados obtenidos por García et al. (2020), cuyas briquetas de biomasa torrefactada con aditivos rondan los 20 MJ/kg. La caracterización realizada para las briquetas de BT-PDA (B1 y B2) muestra que la humedad aumenta considerablemente, teniendo un valor que va desde 9.39 % para el BT obtenido a 310 °C (B2), hasta 11.15 % cuando el BT se obtiene a 280 °C (B1). La materia volátil alcanza un valor 68 % para ambos casos, mientras que las cenizas se encuentran en promedio en un 3.8 % para ambos. En cuanto al carbono fijo, aumentó hasta 28.7 % para las briquetas B1, y finalmente el poder calorífico superior (PCS) ronda los 22.5 MJ/kg para ambos tipos de briquetas.

De acuerdo con el manual ENplus (EPC 2015) y sus requisitos para briquetas de calidad, el valor de humedad no debe superar el 10 %, por lo que las briquetas A1, A2 y B2 cumplen con este parámetro, caso contrario a la briqueta B1, cuya humedad está arriba del 11 %. En cuanto al poder calorífico superior,

todos los tipos de briquetas cumplen con un valor deseable mayor a 16.5 MJ/kg. Apegándose a la norma, ninguna de las briquetas puede ser considerada como unas briquetas de calidad dentro de los lineamientos del manual ENplus por su contenido de cenizas, debido a que superan el umbral de 2 %. Sin embargo, el porcentaje de cenizas obtenido en briquetas procesadas por la torrefacción, como lo muestra el estudio de Azargohar et al. (2019), tiende a valores mayores al 6 %

CONCLUSIONES

El principal producto obtenido de la gasificación de residuos lignocelulósicos es la biomasa torrefactada, con porcentajes en peso en un rango de 55-70 %. El CH_4 tiene un porcentaje en peso de 0.04 a 0.38 %, menor que el CO y CO_2 , que llegan a porcentajes en peso de 2.56 % y 13.66 %, respectivamente.

Los resultados arrojados por el ANOVA sugieren que la mayor cantidad de biomasa torrefactada se obtiene en el experimento en el que se utiliza ADP sin catalizador y a una temperatura en el reactor de pirólisis de 280 °C. Por otra parte, en el caso del metano, con ADP, con uso del catalizador y temperatura de 310 °C, se obtuvo el mayor rendimiento. La producción de biomasa torrefactada y metano

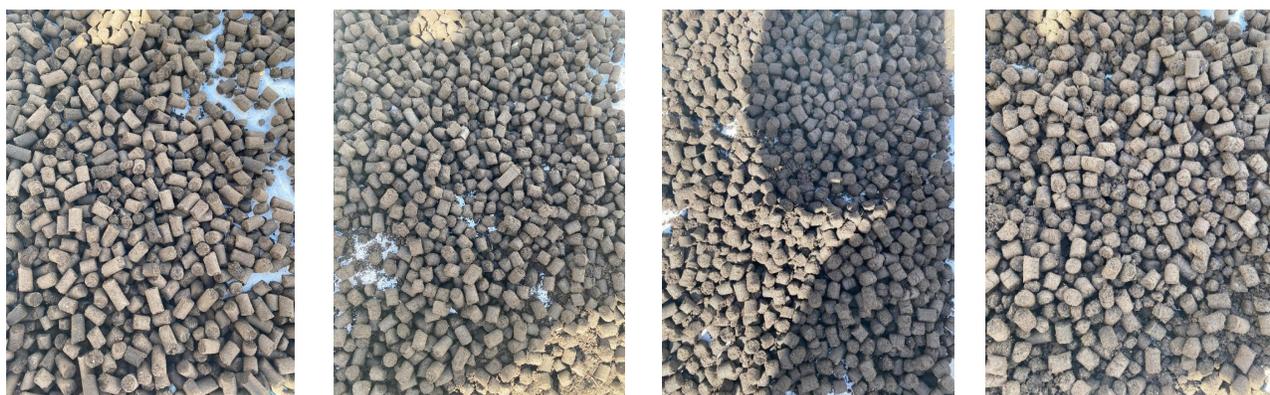


Fig 2. a) Briquetas de ADP-BT (280 °C), **b)** Briquetas de ADP-BT (310 °C), **c)** Briquetas de PDA-BT (280 °C), **d)** Briquetas PDA-BT (310 °C).

CUADRO VII. CARACTERIZACIÓN DE LAS BRIQUETAS.

Análisis	Briqueta A1 (280 °C)	Briqueta A2 (310 °C)	Briqueta B1 (280 °C)	Briqueta B2 (310 °C)
Humedad (%)	5.86 ± 0.12	5.71 ± 0.04	11.15 ± 0.05	9.39 ± 0.18
Materia volátil (%)	69.51 ± 1.15	69.13 ± 1.23	67.53 ± 1.23	68.42 ± 0.39
Cenizas (%)	5.05 ± 0.07	4.15 ± 0.08	3.76 ± 0.05	3.83 ± 0.03
Carbono fijo (%)	25.43 ± 0.61	26.72 ± 0.65	28.70 ± 0.64	27.75 ± 0.21
PCS (MJ/kg)	21.90 ± 0.09	22.99 ± 0.11	22.31 ± 0.08	22.66 ± 0.11

Nota: Los valores reportados son el promedio de tres repeticiones por experimento. La desviación estándar para n=3 queda indicada mediante el símbolo ±.

se comporta de manera inversamente proporcional; a medida que se consume más biomasa durante el proceso de torrefacción, aumenta la cantidad de productos gaseosos, disminuyendo el sólido restante.

La elaboración de briquetas para el ADP se logró con una mezcla de materia prima del 60 % BT y el 40 % ADP, con agua como aglutinante del 40 % en peso en la mezcla. La PDA se densifica igualmente con una mezcla de 60 % de BT y 40 % PDA, pero para este caso el agua que se requiere aumenta a un 55 %. La temperatura de procesamiento de la BT no influyó en las mezclas para elaborar briquetas, pero sí en la longitud del de ellas, siendo para la mezcla de ADP y BT obtenida a 280 °C a partir de la cual se obtuvo la briqueta de mayor longitud (17 mm) y la mejor estructura para el gránulo en relación con su apariencia y manipulación.

De acuerdo con la caracterización de las briquetas, el poder calorífico que presentan es de la magnitud de briquetas procesadas de manera similar y cumple

con el sugerido por el Manual ENplus (EPC 2015), ocurriendo lo contrario con la cantidad de cenizas recomendada por para los cuatro tipos de briquetas analizadas. Debido a esto y a la dificultad de compactación de las briquetas por la disminución de lignina en el material torrefactado, se sugiere disminuir el porcentaje de BT de 60 a 50 % con el complemento de BN para futuros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, así como al Laboratorio Nacional CONAHCYT de Biocombustibles Sólidos (BIOENER). Expresamos asimismo nuestro sincero agradecimiento al fondo de sustentabilidad energética SENER-CONACYT 2014 246911 y al

LANIES con el número de proyecto 321202, por las facilidades brindadas para la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS

- Azargohar R., Soleimani M., Nosran S., Bond, T., Karunakaran C., Dalai A. K. y Tabil L. G. (2019). Thermo-physical characterization of torrefied fuel pellet from co-pelletization of canola hulls and meal. *Industrial Crops and Products* 128, 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.042>
- Basu P. (2010). *Biomass, gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Editorial Elsevier, Oxford, United Kingdom, 365 pp.
- Bettles J., Battisti D.S., Cook-Patton S.C., Kroeger T., Spector J.T., Wolff N.H. y Masuda Y.J. (2021). Agroforestry and non-state actors: a review. *Forest, Policy and Economics* 130, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102538>
- Chen D., Gao A., Ma Z., Fei D., Chang Y. y Shen C. (2018). In-depth study of rice husk torrefaction: Characterization of solid, liquid and gaseous products, oxygen migration and energy yield. *Bioresource Technology*, 253, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.009>
- EPC. (2015). *Manual ENplus: Esquema de certificación de calidad para pellets de madera Parte 3: requisitos de calidad de los pellets*. European Pellet Council. Manual. Bruselas, Bélgica. 10 pp.
- 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>
- Fregoso-Madueño J. N., Goche-Télles J. R., Rutiaga-Quiñones J. G., González-Laredo R. F., Bocanegra-Salazar M. y Chávez-Simental J. A. (2017). Alternative uses of sawmill industry waste. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 23(2), 243-260. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- García R., González-Vázquez M. P., Martín A. J., Pevida C. y Rubiera F. (2020). Pelletization of torrefied biomass with solid and liquid bio-additives. *Renewable Energy* 151, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.004>
- Gupta J., Kumari M., Mishra A., Akram M. y Thakur I. S. (2022). Agro-forestry waste management-A review. *Chemosphere* 287, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132321>
- ISO (2015a). Norma UNE-EN ISO 18122:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza. AENOR Internacional, España. Noviembre 2015
- ISO (2015b). Norma UNE-EN ISO 18123:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil. AENOR Internacional, España. Noviembre 2015
- ISO (2017a). Norma UNE-EN ISO 18125:2017. Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. AENOR Internacional, España Mayo 2017
- ISO (2017b). Norma UNE-EN ISO 18134-2:2017. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa: Parte 2. AENOR Internacional, España. Febrero 2017
- Kumar J., Sathish S., Prabu D., Renita A. A., Saravanan A., Deivayanai V. C. y Hosseini-Bandegharai A. (2023). Agricultural waste biomass for sustainable bioenergy production: Feedstock, characterization and pre-treatment methodologies. *Chemosphere*, 331, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138680>
- Montgomery, D. y Runger, C. (2003). *Probabilidad y estadística aplicada a la Ingeniería*. Segunda edición. Editorial Limusa, DF, México, 817 pp.
- Muñoz-Rodríguez D., Aparicio-Martínez P. y Perea-Moreno A. J. (2022). Contribution of Agroforestry Biomass Valorisation to Energy and Environmental Sustainability. *Energies*, 15(22), 1-7 <https://doi.org/10.3390/en15228670>
- Noushabadi A. S., Dashti A., Ahmadijokani F., Hu J. y Mohammadi A. H. (2021). Estimation of higher heating values (HHVs) of biomass fuels based on ultimate analysis using machine learning techniques and improved equation. *Renewable Energy*, 179, 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.003>
- Pahla G., Ntuli F. y Muzenda E., (2018). Torrefaction of landfill food waste for possible application in biomass. *Waste Management*. 71, 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.035>
- Parascanu M. M., Sandoval-Salas F., Soreanu G., Valverde J. L. y Sanchez-Silva L. (2017). Valorization of Mexican biomasses through pyrolysis, combustion and gasification processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 509-522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.079>
- PNUD (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. A/RES/70/1.

- Programa para las Naciones Unidas para el Desarrollo. Agenda. Nueva York, EUA, 36 pp.
- Reyes-Muro L., Camacho-Villa T. C. y Guevara-Hernández F. (2013). Rastrojos: manejo, uso y mercado en el centro y sur de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Aguascalientes, México, 242pp.
- Ruiz-Mercado I., Masera O., Zamora H. y Smith K. R. (2011). Adoption and sustained use of improved cookstoves. *Energy policy* 39(12), 7557-7566. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.028>
- Ruiz-García V. y Masera O. (2018). Estimating kitchen PM2.5 and CO concentration out of stove emissions: The case of mexican plancha-type stoves. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México, 20 pp.
- Ruiz-García V., Edwards R. D., Ghasemian M., Bherrueta V. M., Princevac M., Vázquez J., Johnson M. y Masera O. (2018). Fugitive emissions and health implications of plancha-type stoves. *Environmental science & technology* 52(18), 10848-10855. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01704>
- Ruiz-García V., Medina P., Vázquez J., Villanueva D., Ramos S. y Masera, O. (2021). Bioenergy devices: energy and emissions performance for the residential and industrial sectors in Mexico. *BioEnergy Research* 15, 1764-1776. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10362-5>
- Ruiz-García V., Huerta-Mendez M. Y., Vázquez-Tinoco J., Alvarado-Flores J. J., Berrueta-Soriano V. M., López-Albarrán P., Masera O. y Rutiaga-Quiñones J. G. (2022). Pellets from Lignocellulosic Material Obtained from Pruning Guava Trees: Characterization, Energy Performance and Emissions. *Sustainability* 14(3), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su14031336>
- Rutiaga-Quiñones J. G., Pintor-Ibarra L. F., Orihuela-Equihua R., Gonzalez-Ortega N., Ramírez-Ramírez M. A., Carrillo-Parra A., Carrillo-Ávila N., Navarrete-García M. A., Ruiz-Aquino F., Rangel-Méndez J. R., Hernández-Solís J. y Luján-Álvarez C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources* 15(4), 8529-8553. DOI 10.15376/biores.15.4.8529-8553
- Sarker T. R., Azargohar R., Stobbs J., Karunakaran C., Meda V. y Dalai A. K. (2022). Complementary effects of torrefaction and pelletization for the production of fuel pellets from agricultural residues: a comparative study. *Industrial Crops and Products* 181, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114740>
- SENER (2022). Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía. Reporte. CDMX, México. 242 pp. <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>
- Talero G., Rincón S. y Gómez A. (2019). Torrefaction of oil palm residual biomass: Thermogravimetric characterization. *Fuel* 242, 496-506. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.057>
- Tauro R., García C. A., Skutsch M. y Masera O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- 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. Michoacán, México, 79 pp.
- Xu L., Zhou J., Ni J., Li Y., Long Y. y Huang R. (2020). Investigating the pyrolysis kinetics of *Pinus sylvestris* using thermogravimetric analysis. *BioResources* 15(3), 5577-5592. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5577-5592>