



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**  
**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE  
CARPINTERÍA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN TABASCO**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

**JAVIER EK PÉREZ**

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

**DRA. LILIANA PAMPILLÓN GONZÁLEZ**

EN CODIRECCIÓN DE:

**DRA. NANCY GUADALUPE GONZÁLEZ CANCHÉ**

**VILLAHERMOSA, TABASCO, MARZO DE 2025**

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 18 del mes febrero del año 2025, el que suscribe **Javier Ek Pérez** alumno del Programa de **Ingeniería Ambiental** con número de matrícula **182G24037**, adscrito a la **División Académica de Ciencias Biológicas**, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Ambiental** y titulada **“Obtención de biocombustible sólido a partir de residuos de carpintería como alternativa energética en Tabasco”** dirigida por la Dra. Liliana Pampillón González y la Dra. Nancy Guadalupe González Canché.

### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 18 de febrero 2025.



Javier Ek Pérez

---

Nombre y firma del tesista



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 06 de Febrero de 2025

**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. JAVIER EK PÉREZ** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CARPINTERÍA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN TABASCO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

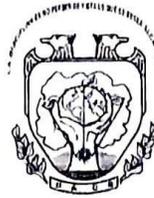


C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**



FEBRERO 06 DE 2025

**C. JAVIER EK PÉREZ  
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL  
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CARPINTERÍA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN TABASCO"**, asesorado por la Dra. Liliana Pampillón González y Dra. Nancy Guadalupe González Canché, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Gaspar López Ocaña, Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dra. Liliana Pampillón González, Dr. José Ángel Gaspar Génico y Dr. Arturo Valdés Manzanilla.

**ATENTAMENTE  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

U.J.A.T.  
DIRECCIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p.- Expediente del Alumno.  
Archivo.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**2024**  
**Felipe Carrillo**  
**PUERTO**  
ESTADISTA DE PROLETARIADO,  
REVOLUCIONARIO Y SECULAR  
MEXICANO DE  
MÉXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

23 de octubre de 2024

**C. Javier Ek Pérez**  
**Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental**  
**PRESENTE**

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su documento de Tesis "**OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CARPINTERÍA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN TABASCO**".

**OBSERVACIONES:**

Se incluyó citas, se excluyeron bibliografía y fuentes pequeñas (o palabras), y se limitó el tamaño de coincidencias a 16 palabras.

<b>RESULTADO DE SIMILITUD</b>	<b>8 %</b>
	<b>10576 palabras, 21 coincidencias y 12 fuentes</b>

Finalmente, se le solicita al **C. Javier Ek Pérez**, integrar en la versión final del trabajo recepcional (Tesis), este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**

**UJAT.**  
**DIVISIÓN ACADÉMICA**  
**DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN**

C.c.p. Dra. Liliana Pampillón González. Directora de trabajo recepcional.  
C.c.p. Archivo

# OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CARPINTERÍA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN TABASCO

INFORME DE ORIGINALIDAD

# 8%

ÍNDICE DE SIMILITUD

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Internet	196 palabras — 2%
2	<a href="http://www.voaxaca.tecnm.mx">www.voaxaca.tecnm.mx</a> Internet	122 palabras — 2%
3	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet	59 palabras — 1%
4	<a href="http://dspace.espol.edu.ec">dspace.espol.edu.ec</a> Internet	42 palabras — 1%
5	<a href="http://documentop.com">documentop.com</a> Internet	36 palabras — < 1%
6	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Internet	34 palabras — < 1%
7	<a href="http://www.ecosur.mx">www.ecosur.mx</a> Internet	27 palabras — < 1%
8	<a href="http://www.repositorio.unach.edu.pe">www.repositorio.unach.edu.pe</a> Internet	24 palabras — < 1%
9	<a href="http://sitio.ecosur.mx">sitio.ecosur.mx</a> Internet	23 palabras — < 1%

---

10	<a href="http://www.scielo.org.co">www.scielo.org.co</a> Internet	19 palabras — < 1%
11	<a href="http://www.scielo.sa.cr">www.scielo.sa.cr</a> Internet	18 palabras — < 1%
12	<a href="http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es">www.investigacion.biblioteca.uvigo.es</a> Internet	16 palabras — < 1%

---

EXCLUIR CITAS

DESACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

< 10 PALABRAS

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 16 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 18 de febrero de 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“Obtención de biocombustible sólido elaborado a partir de residuos de carpintería como alternativa energética en Tabasco”**.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

  
\_\_\_\_\_  
Javier Ek Pérez

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Liliána Pampillón González

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Nancy Guadalupe González  
Canché

TESTIGOS

  
\_\_\_\_\_  
Amber de la Cruz Urbani

  
\_\_\_\_\_  
Néstor Adrián Vázquez de la Cruz

## Agradecimientos

Principalmente a Dios por darme la oportunidad de llegar hasta aquí.

A mi mamá quien es el pilar más importante en mi vida, por toda su dedicación y amor incondicional, siempre guiándome por el camino correcto, por apoyarme en mis decisiones y siempre creer en mí.

A mi hermano, quien siempre me ha cuidado, me aconseja y siempre ha estado cuando lo necesito, y qué sin él, no hubiera llegado al Laboratorio de Bioenergía y Sustentabilidad y hoy mi vida sería muy diferente.

A mis asesoras, quienes me dieron la oportunidad de ser parte de este gran proyecto en vinculación con El Colegio de la Frontera Sur, por estar a mi lado durante estos años y brindarme toda su sabiduría y confianza, por ayudarme a crecer no solo personalmente, si no también académicamente y demostrarme que soy más capaz de lo que creo.

Al Ingeniero Daniel Mazariego, quien me apoyó en la parte más difícil que fue aprender a usar la pelletizadora y a encontrar la formulación ideal para la elaboración de los pellets, por brindarme sus conocimientos, confianza y su amistad.

A mis amigos y compañeros del laboratorio, en especial a Helen por ensuciarse las manos junto conmigo tanto para hacer mis análisis como la elaboración de mis pellets y a Isabel por ser mi mejor amiga y compañera estos últimos años.

A mi Dream Team: Salma, Jennifer, Daniel y la más importante: Ysabel, quienes me brindaron su apoyo, su amistad y fueron mi lugar seguro durante toda la carrera.

## Tabla de contenido

Índice de tabla .....	I
Índice de figuras .....	I
Resumen .....	II
Abstract .....	III
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b> .....	<b>6</b>
<b>4. Hipótesis</b> .....	<b>7</b>
<b>5. Objetivos</b> .....	<b>7</b>
5.1 Objetivo General .....	7
5.2 Objetivos Específicos .....	7
<b>6. Metodología</b> .....	<b>8</b>
6.1 Área de Estudio .....	9
6.2 Recolección de Muestras .....	10
6.3 Pretratamiento de la Muestra .....	11
6.4 Caracterización Inicial de la Biomasa .....	11
6.5 Elaboración y Formulación de Biocombustibles Sólidos (Pellets) .....	15
6.6 Caracterización Final de los Biocombustibles Sólidos (Pellets) .....	18
6.6.7 Análisis estadístico del poder calorífico de los biocombustibles sólidos (pellets) .....	21
<b>7. Resultados y discusión</b> .....	<b>22</b>
7.1 Caracterización inicial de la biomasa (materia prima) .....	22
7.2 Caracterización final de los biocombustibles sólidos (pellets) .....	24
<b>Conclusiones</b> .....	<b>35</b>
<b>Perspectivas</b> .....	<b>36</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>37</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>44</b>

## Índice de tabla

Tabla 1. Antecedentes en investigaciones relacionadas a pellets de residuos de carpintería.....	3
Tabla 2. Coordenadas de la carpintería Bacho.....	10
Tabla 3. Propiedades consideradas para la calidad de los pellets de acuerdo con UNE-EN ISO 17225-2:2014.....	21
Tabla 4. Análisis proximal y energético de las materias primas utilizadas (residuos de carpintería) .....	22
Tabla 5. Análisis energético, físico y mecánico de los biocombustibles sólidos (pellets) .....	25
Tabla 6. Análisis de varianza del poder calorífico de los pellets .....	26
Tabla 7. Comparaciones en parejas de Tukey .....	27
Tabla 8. Análisis elemental de las materias primas y pellets .....	33
Tabla 9. Comparativa de los valores de referencia de UNE-EN ISO 17225-2:2014 con los obtenidos en esta investigación.....	34

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema metodológico empleado para la investigación .....	8
Figura 2. Ubicación de la carpintería Bacho .....	9
Figura 3. Etapas para el pretratamiento de la biomasa .....	11
Figura 4. Materiales y equipos utilizados para la caracterización inicial .....	12
Figura 5. Material y equipo usado para la determinación del poder calorífico .....	15
Figura 6. Proceso de elaboración de los biocombustibles sólidos (pellets) .....	17
Figura 7. Medición del diámetro y longitud de los pellets.....	18
Figura 8. Medición de la densidad aparente de los pellets.....	19
Figura 9. Pellets de biomasa obtenidos.....	25
Figura 10. Comparaciones en pareja de Tukey .....	27
Figura 11. Análisis TGA de las materias primas.....	28
Figura 12. Análisis TGA de los pellets.....	29
Figura 13. Comparativa de las muestras antes y después del pelletizado.....	31
Figura 14. Derivada del TGA .....	32

## Resumen

En el mundo se generan una gran cantidad de residuos cuyo manejo o disposición final aún representa un gran desafío. Unos de estos residuos son los generados en actividades como la carpintería, en forma de aserrín, viruta y polvo. El manejo inadecuado de estos residuos como su combustión tiene un impacto negativo al ambiente y a la salud pública. Una alternativa atractiva para su gestión es su valorización en aplicaciones bioenergéticas.

El objetivo de este trabajo fue elaborar y caracterizar un biocombustible sólido (pellet) a partir de residuos de carpintería (aserrín de *Cedrela odorata* L. y aserrín de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC y una mezcla de ambos), con características comparables con los estándares internacionales.

La metodología llevada a cabo consistió en la determinación de las propiedades proximales, energéticas y fisicoquímicas según normas internacionales como ASTM y UNE-EN, así como termogravimetría (TGA), y el análisis elemental. Se comparó la calidad de los pellets según la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 para localizar el campo de aplicación de estos biocombustibles.

Los resultados muestran que los pellets elaborados a partir de mezcla de aserrín, poseen las mejores propiedades en cuanto a poder calorífico (18476 kJ/kg), por encima de los valores de (16,500 kJ/Kg). Con respecto a la norma de calidad de los pellets, los clasifica como de uso residencial o comercial presentando bajos contenidos de humedad, una densidad aparente de 0.616 g/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de friabilidad del 90%, lo cual favorece su manipulación y logística.

**Palabras clave:** pellets, aserrín, bioenergía, carpintería

## Abstract

A large amount of waste is generated worldwide, and its management or final disposal represents a great challenge. Some of these wastes are those generated from activities such as woodworking, in the form of sawdust, shavings and dust. Improper handling of these wastes like their combustion has a negative impact on the environment and public health, because they are burned without any control. An attractive alternative for its management is their valorization in bioenergy applications.

The objective of this work was to elaborate and characterize a solid biofuel (pellet) from woodworking waste (*Cedrela odorata* L. sawdust, *Tabebuia rosea* sawdust (Bertol.) DC and a mixture of both), with characteristics comparable to international standards.

The methodology performed involved the determination of proximate, energetic and physicochemical properties according to ASTM and UNE-EN standards as well as techniques such as thermogravimetry (TGA) and elemental analysis. The quality of pellets was compared according to UNE-EN ISO 17225-2:2014 Standard in order to locate the field of application for these biofuels.

The results showed that the pellets made from the sawdust mixture exhibited the best calorific value (18476 kJ/Kg), above the recommended values (16,500 kJ/Kg). With respect to the pellet's quality standard, classifies them for residential or commercial use, presenting low moisture content, a density of 0.616 g/cm<sup>3</sup> and a friability percentage of 90%, which favors its handling and logistics.

**Key words:** pellets, sawdust, bioenergy, woodworking

## 1. Introducción

El uso intensivo de la energía basada en la quema de combustibles de origen fósil como el petróleo, carbón y gas ha sido uno de los principales insumos del crecimiento económico durante varias décadas, tanto en países desarrollados como en desarrollo. Sin embargo, la externalidad negativa asociada al consumo de este tipo de combustibles son las emisiones de gases efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés) (International Energy Agency [IEA], 2018, como se citó en Catalán, 2020).

Las emisiones globales de CO<sub>2</sub> por el uso de combustibles fósiles han aumentado significativamente en las últimas décadas. El Centro de Análisis de Información de Dióxido de Carbono registró que en el periodo de 1970 a 2016, las emisiones de CO<sub>2</sub> incrementaron en 90%, y son la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales los que contribuyen aproximadamente en 78% del total de las emisiones (Le Quéré et al. 2016).

En respuesta a esta situación, se ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía hacia una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Una de estas alternativas es la bioenergía, la cual es aquella que se obtiene de la biomasa, es decir que se produce a partir de materiales orgánicos, como pueden ser residuos orgánicos municipales, agroindustriales y forestales. Entre los biocombustibles que pueden obtenerse a partir de la biomasa se encuentran los biocombustibles sólidos, los cuales se producen a partir de un tratamiento físico de la misma.

Al utilizar biocombustibles sólidos se reducen considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub>; puesto que la biomasa ya ha capturado CO<sub>2</sub> durante su desarrollo y crecimiento; de tal forma que, durante su combustión, se emite una cantidad equivalente a la capturada durante los procesos biológicos ya mencionados (Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos para la Producción de Energía, 2015).

El estado de Tabasco tiene una superficie de 24,731 km<sup>2</sup>, concentra 19.2 % de las plantaciones forestales comerciales con especies maderables de México, o sea 26,109 ha, cuyas especies más representativas son cedro (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King.) y macuilís (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.) entre las nativas (CONAFOR-CP, 2011; CONAFOR, 2012, como se citó en Martínez et al. 2015).

Una de las actividades en las que se aprovechan estos recursos forestales es la carpintería, de acuerdo con información del DENUE, en el estado de Tabasco existen 998 carpinterías, de las cuales, 280 se encuentran en los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Paraíso y Cunduacán, municipios que pertenecen a la Región Chontalpa. Derivado de las actividades de transformación de la madera, se genera una variedad de residuos en forma sólida, como lo son: la viruta, el aserrín y el polvo.

Estos residuos representan una fuente de biomasa interesante para ser empleadas como bioenergéticas. En este sentido, en el marco del Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia “Plataforma multi-actor para la democratización energética desde iniciativas de economía social y solidaria en comunidades rurales-urbanas en Tabasco” en el cual participan la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y El Colegio de la Frontera Sur como instituciones académicas, se propone llevar a cabo la elaboración de comprimidos de biomasa (pellets) a partir del aprovechamiento de los residuos de carpintería para su posterior caracterización energética, mecánica y proximal.

Lo anterior, contribuirá a valorizar desde el punto de vista energético un material residual, y minimizar los impactos ambientales del manejo inadecuado de estos residuos.

## 2. Antecedentes

En este apartado se presenta las investigaciones más relevantes en torno al aprovechamiento de los residuos de actividades productivas como las carpinterías a fin de tener un panorama hacia dónde van los avances relacionados a la elaboración de pellets.

*Tabla 1. Antecedentes en investigaciones relacionadas a pellets de residuos de carpintería*

<b>Año</b>	<b>Nombre del artículo</b>	<b>Descripción de la investigación</b>	<b>Autores</b>	<b>Ciudad, país</b>
2011	Análisis comparativo de la biomasa residual brasileña para la Producción de Pellets	El objetivo de este trabajo es estudiar y evaluar la implementación de sistemas de producción de pellets utilizando residuos como cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar y aserrín de Eucalyptus sp obtenido de carpinterías, así como la caracterización de estos residuos para determinar las mezclas óptimas de pellets.	Bruna Missagia, Maurício Ferreira Silva Corrêa, Islam Ahmed, Hans-Joachim Krautz and Peter Ay	Brasil
2012	Caracterización y viabilidad de pellets de combustible de biomasa fabricados con residuos colombianos de madera, coco y	Este trabajo tiene como objetivo evaluar las principales propiedades de los residuos de la industria maderera colombiana, cáscaras de coco y palma aceitera y comparar las características de los pellets elaborados a partir de estas	Carlos Andrés Forero Núñez, Joachim Jochum, Fabio Emiro Sierra Vargas	Colombia

	palma aceitera con respecto a las normas europeas	materias primas con los estándares europeos.		
2015	Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual	Se presentan los resultados de la caracterización físico-química de pellets producidos en mezcla 50/50 de carbón antracita y madera residual (carpinterías de la ciudad de Bogotá), además, de la discusión sobre los resultados, ventajas y desventajas de los biocombustibles aglomerados.	Luis Eduardo Atuesta Boada, Fabio Emiro Sierra Vargas	Colombia
2020	Diseño de combustibles sólidos recuperados a partir de residuos sólidos urbanos y biomasa.	Los combustibles sólidos recuperados son una alternativa viable a los combustibles sólidos convencionales. Diseño de combustibles recuperados procedente de tres tipos de residuos para la determinación de sus propiedades como combustible y su valor económico en el mercado.	Gallardo Izquierdo, Antonio; Carlos Alberola, Mar; Colomer Mendoza, Francisco J.; Edo Alcón, Natalia; Jorge Ortiz, Andrea	España
2021	Características del pellet de madera de aserrín pelletizado con la	Utilización de tres especies de madera para la fabricación de pellets y su	Wahyudi, M Arifudin, DIM Annakotapary,	Indonesia

	picadora de carne manual	posterior caracterización proximal y física.	and NI Sariningsih	
2022	Sobre las oportunidades potenciales de desarrollo de la producción de biocombustibles sólidos en Rusia	El artículo considera las posibilidades de ampliar la carpintería existente. empresas debido a los subsidios estatales para el desarrollo de energías renovables. Se propone Utilizar residuos de madera y residuos agrícolas lignificados (paja) juntos como materias primas para la producción de biocombustibles sólidos. Una evaluación de la reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> de una empresa maderera a la hora de sustituir los combustibles tradicionales por biocombustibles sólidos	N V Ozerova, I V Korolev, A A Zavyalova and N V Vasilyeva	Rusia

Como se observa en la tabla 1, los estudios previos han analizado tanto económicamente como energética la biomasa para la producción de energía como respuesta a los impactos negativos de la utilización de combustibles fósiles. Debido a esto, la industria de pellets de madera ha aumentado en los últimos años, por lo que, es necesario evaluar nuevas fuentes de biomasa, como son los residuos de carpintería y comparar las características de los pellets elaborados con esta materia prima con los estándares internacionales.

### 3. Justificación

Se realizó una entrevista semiestructurada a los trabajadores y al dueño de la carpintería Bacho Carpintero, en donde comentaron que las especies que más utilizan son el cedro (*Cedrela odorata* L.) y macuili (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.) como materia prima para la fabricación de muebles en serie para la casa y oficina (sillas, roperos, camas, escritorios, cajoneras, etc), generando diversos residuos debido a la utilización de herramientas y equipos para realizar cortes y acabados.

Los residuos generados son: viruta, polvo de madera, aserrín, corteza y trozos de madera de diferentes tamaños, los cuales en muchas ocasiones son quemados provocando una problemática ambiental.

Una de las alternativas de aprovechamiento de estos residuos es la fabricación de pellets de biomasa de los residuos de aserrín generados en las carpinterías. Los pellets son unos cilindros pequeños compactados de biomasa, los cuales mejoran considerablemente las condiciones de la biomasa, aumentando la densidad energética, además de que pueden presentar bajos contenidos de humedad y de cenizas. Sin embargo, la información al respecto de los pellets empleando biomasa de carpintería aún es dispersa.

De acuerdo con Fregoso-Madueño et al. (2017) en México, la disposición de subproductos sólidos de la madera puede generar problemas en terrenos forestales y aserraderos, ya que puede provocar incendios forestales durante períodos de calor intenso, generar polvo en el aire y bloquear espacios en las instalaciones de producción.

De ahí la importancia de generar información local; además, a través del enfoque de economía circular se busca que haya cero residuos, es decir que todo se aproveche dentro del sistema, ir dotando a los generadores con recursos energéticos locales y disponibles en la región.

En términos, sociales y económicos el uso de tecnologías de aprovechamiento de la biomasa residual contribuye a reducir la pobreza energética proponiendo alternativas de acceso a combustibles biomásicos. Dentro de las principales ventajas que ofrece el uso de este tipo de fuentes de energía se encuentran: la fácil obtención, los bajos niveles de emisión de gases de efecto a invernaderos producidos por los procesos de transformación y el bajo costo de recolección (Speight, 2008).

#### **4. Hipótesis**

Los residuos de madera provenientes de las carpinterías pueden ser transformados a un material densificado con un poder calorífico viable para su utilización como biocombustible sólido.

#### **5. Objetivos**

##### **5.1 Objetivo General**

Elaborar y caracterizar un biocombustible sólido (pellet) a partir de residuos de carpintería que cumpla con las especificaciones para su uso como biocombustible.

##### **5.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los residuos forestales generados en procesos de carpintería. Ubicada en la rancharía occidente, en el municipio de Comalcalco, Tabasco.
- Evaluar y seleccionar residuos generados en procesos de carpintería con propiedades atractivas para producir biocombustibles
- Formular y caracterizar biocombustibles sólidos a partir de los residuos seleccionados
- Evaluar las propiedades de los biocombustibles sólidos formulados identificando el campo de uso para los mismos con base a estándares internacionales

## 6. Metodología

En este capítulo se muestra de manera detallada las etapas desarrolladas para la elaboración de los biocombustibles sólidos (pellets). En la figura 1 se observa un esquema del proceso metodológico empleado.

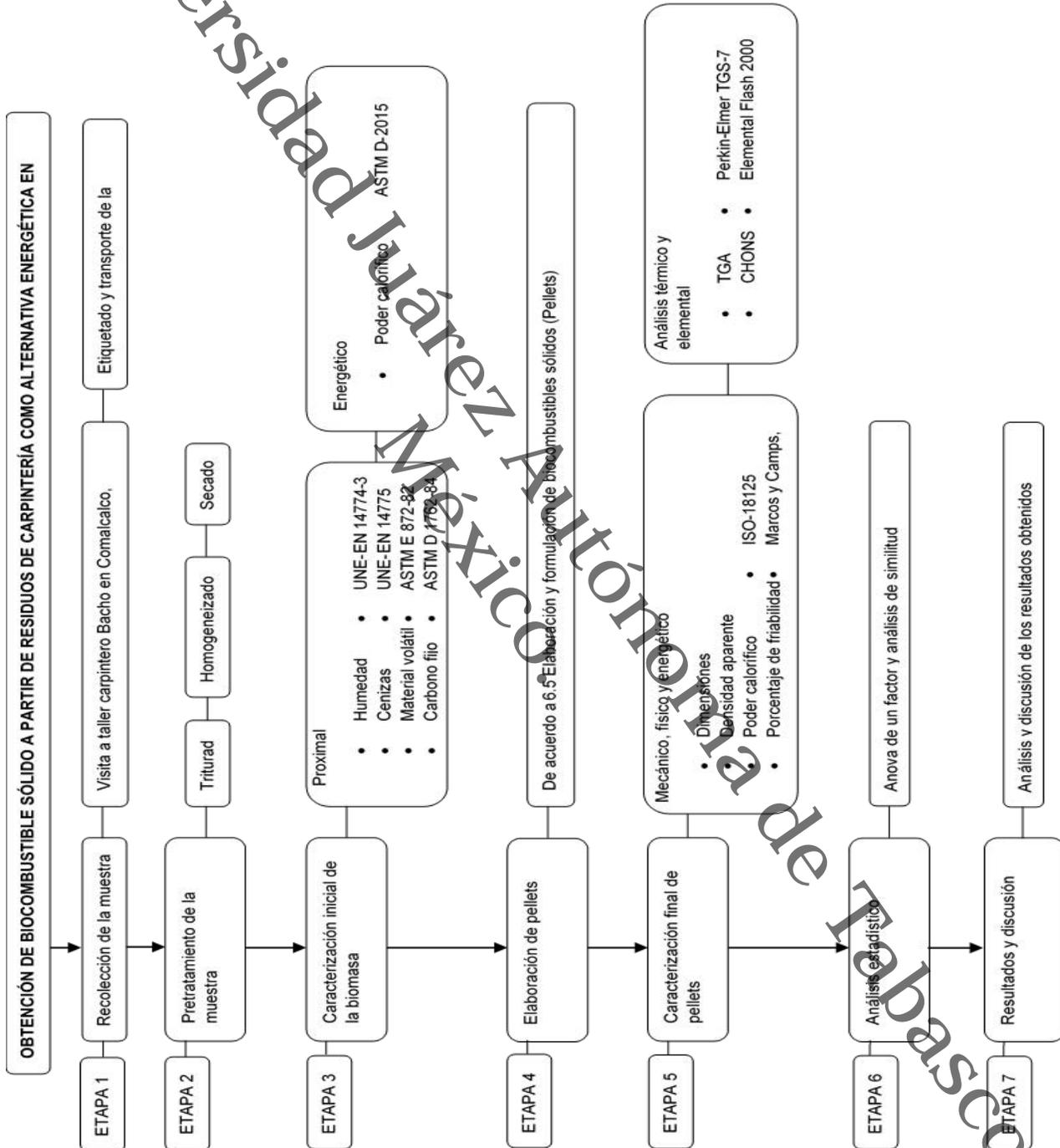


Figura 1. Esquema metodológico empleado para la investigación

## 6.1 Área de Estudio

Las muestras de aserrín de cedro (*Cedrela odorata* L.) y macuili (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.) (materia prima para la formulación de los pellets), fueron obtenidas en la carpintería Bacho Carpintero, localizada la ranchería Occidente, en el municipio de Comalcalco, Tabasco.

Esta carpintería forma parte de los colectivos involucrados en el proyecto de investigación e incidencia social, titulado “Plataforma multi-actor para la democratización energética desde iniciativas de economía social y solidaria en comunidades rurales-urbanas en Tabasco”, financiado por el CONAHCYT a través de la Convocatoria de Proyectos Estratégicos Nacionales (PRONACES) y desarrollado en vinculación con El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR – Unidad Villahermosa).

En la figura 2 se muestra la ubicación de la carpintería Bacho.

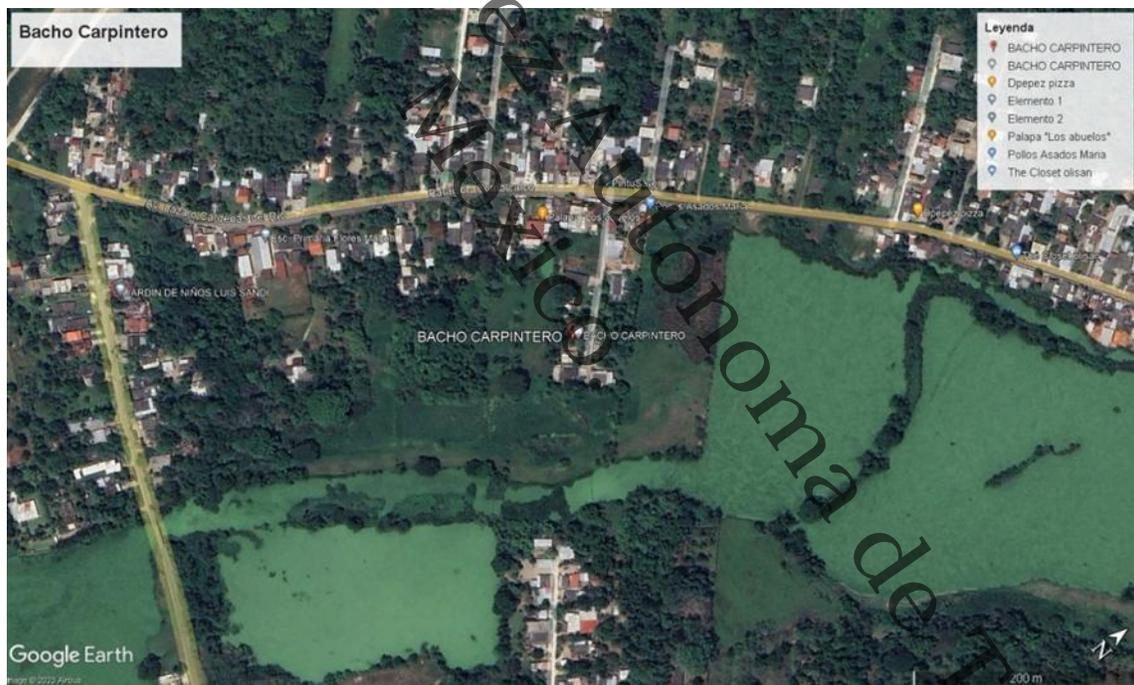


Figura 2. Ubicación de la carpintería Bacho

En la tabla 2 se presentan las coordenadas geográficas de la carpintería Bacho.

**Tabla 2. Coordenadas de la carpintería Bacho**

Coordenadas UTM	
X	Y
18°18'43.84" N	93°12'30.91" O

Fuente: Google Earth, fecha de consulta: 24/10/2023

## 6.2 Recolección de Muestras

La primera etapa de la investigación consideró la recolección de la materia prima a utilizar. Para lo anterior, se realizaron visitas a diversos puntos de generación de biomasa residual, siendo la carpintería Bacho un sitio importante para la recolección de muestra.

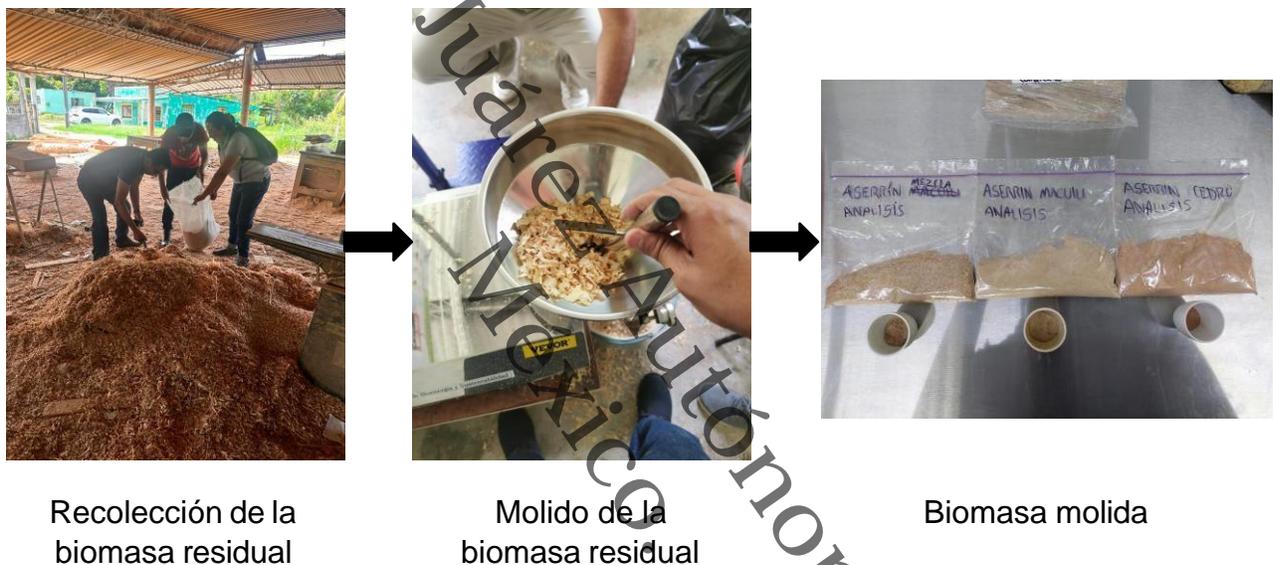
La carpintería Bacho está localizada en el municipio de Comalcalco (Figura 2), corresponde a una unidad de producción de muebles de madera en serie (sillas, roperos, camas, escritorios, cajoneras) que comúnmente emplea cedro (*Cedrela odorata* L.), macuili (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.) y caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en sus procesos y que provee a diversas mueblerías del municipio. Para este estudio, se emplearon las especies de cedro y macuili debido a que son las más utilizadas en la carpintería, puesto que la caoba solo se utiliza para la elaboración de muebles bajo pedido.

Una vez identificadas las especies de mayor uso se recolectaron muestras de aserrín, fueron etiquetadas para ser transportadas al laboratorio de Bioenergía y Sustentabilidad de la DACBIOL, para evaluar su potencial como materia prima para la formulación de los pellets.

### 6.3 Pretratamiento de la Muestra

Como primera etapa la biomasa residual obtenida de los residuos de carpintería se almacenó en bolsas herméticas para evitar el contacto con la humedad del ambiente y posteriormente se trituró la muestra utilizando un molino eléctrico VEVOR modelo HR-3000 el cual tiene una perilla que permite ajustar la finura del polvo al tamaño requerido, las muestras resultantes se almacenaron en bolsas herméticas y se etiquetaron para su posterior análisis.

En la figura 3 se muestran las etapas que se llevaron a cabo para el pretratamiento de la biomasa residual para su posterior análisis.

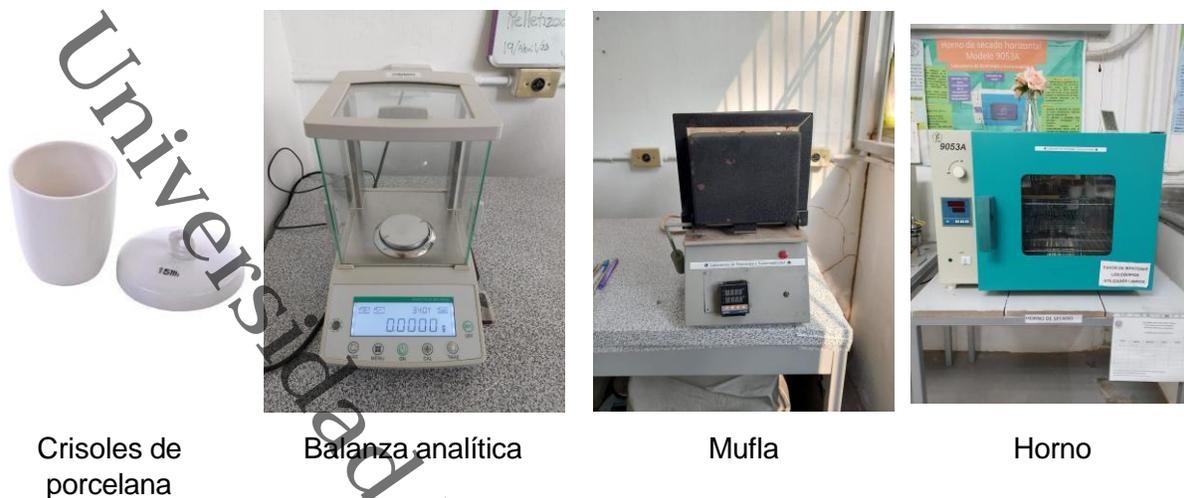


*Figura 3. Etapas para el pretratamiento de la biomasa*

### 6.4 Caracterización Inicial de la Biomasa

En esta etapa se describen los métodos empleados para la caracterización proximal y energética de las materias primas, todas las caracterizaciones se desarrollaron por triplicado en base seca.

En la figura 4 se observan los materiales y equipos utilizados para los análisis proximales de la biomasa residual previamente molida.



**Figura 4. Materiales y equipos utilizados para la caracterización inicial**

#### 6.4.1 Contenido de Humedad

El contenido de humedad se determinó de acuerdo a la norma UNE-EN 14774-3 (2010). Se colocaron 3 crisoles vacíos en la estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 24h y se dejaron reposar en un desecador durante 5 minutos, después se registró su peso, se añadió a cada crisol 1 gramo de muestra y se colocaron en la estufa a la misma temperatura durante 24h, se dejaron reposar durante 5 minutos en un desecador para registrar su peso final.

El contenido de humedad se determinó con base a la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

*Ecuación 1*

CH = Contenido de humedad (%)

P<sub>i</sub> = Peso inicial (g)

P<sub>f</sub> = Peso final (g)

#### 6.4.2 Contenido de Cenizas

El contenido de cenizas se determinó de acuerdo a la norma UNE-EN 14775 (2009). Se colocaron crisoles vacíos en una mufla a temperatura de  $550 \pm 10^\circ\text{C}$  durante 1 hora. Después se colocaron en un desecador para enfriarlos a temperatura ambiente, una vez fríos se registró su peso.

Posteriormente, se colocó un gramo de muestra en cada crisol y se registró su peso inicial, después se ingresaron a la mufla a una temperatura de  $250 \pm 10^\circ\text{C}$  por un periodo de 30 minutos, pasados los 30 minutos se mantuvo esta temperatura durante 1 hora y enseguida se incrementó a  $550 \pm 10^\circ\text{C}$  durante un periodo de 2 horas y 30 minutos, para finalizar los crisoles se colocaron en un desecador para dejarlos enfriar y se registró su peso.

El contenido de cenizas se determinó con base en la siguiente ecuación:

$$Ad = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Ad = Contenido de cenizas (%)

$m_1$  = Masa del crisol vacío (g)

$m_2$  = Masa del crisol con la muestra (g)

$m_3$  = Masa del crisol con las cenizas (g)

#### 6.4.3 Materia Volátil

El contenido de materia volátil se determinó de acuerdo a la norma ASTM E-872-82 (1998). El primer paso fue colocar los crisoles en la mufla a una temperatura de  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  durante siete minutos. Se quitaron los crisoles de la mufla y se dejaron enfriar a temperatura ambiente en un desecador para registrar el peso (crisol + tapa). Se añadió un gramo de muestra en cada crisol con tapa (previamente se secó la muestra en un horno a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 24h) y se colocaron en la mufla a una temperatura de  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  durante siete minutos, para finalizar se dejaron enfriar y se registró su peso final.

El contenido de materia volátil se determinó con base en la siguiente ecuación:

$$Vd = 100x \frac{(W_i - W_f)}{(W_i - W_c)}$$

Ecuación 3

Donde:

Vd = Materia volátil (%)

W<sub>c</sub> = Peso del crisol (g)

W<sub>i</sub> = Peso inicial (crisol + muestra) (g)

W<sub>f</sub> = Peso final (g)

#### 6.4.4 Carbono Fijo

Para determinar el carbono fijo se utilizó el procedimiento establecido en la norma ASTM D-1762-84 (2021), en la cual establece la siguiente ecuación para el cálculo de dicha variable:

$$CF = 100 - (MV + CC)$$

Ecuación 4

Donde:

CF = Carbono fijo (%)

MV = Materia volátil (%)

CC = Contenido de cenizas (%)

#### 6.4.5 Poder Calorífico

El poder calorífico se determinó en una bomba calorimétrica APEX-4, de acuerdo con la norma ASTM D-2015. Para ello, fue necesario utilizar 0.5 g de muestra en polvo, previamente homogeneizada que se colocó dentro de una cápsula de acero inoxidable. El análisis del contenido energético se realizó por triplicado, el cual ocurre a partir de una combustión controlada en una camisa adiabática, adicionado 10ml de agua desionizada en condiciones de presurización ( $\leq 3$  MPa y atmósfera de oxígeno) y el poder calorífico se determina en unidades de kJ/kg.



*Figura 5. Material y equipo usado para la determinación del poder calorífico*

#### 6.5 Elaboración y Formulación de Biocombustibles Sólidos (Pellets)

Para la fabricación de pellets se homogeneizó la muestra a un tamaño menor a 6 mm utilizando un molino eléctrico VEVOR HR-3000 el cual tiene una perilla que permite ajustar el tamaño de partícula.

Una vez obtenido el material molido se integraron dos componentes adicionales para la formulación de biocombustibles, los cuales fueron agua destilada y aceite vegetal. En la producción de pellets el control de la humedad es importante puesto que un material muy seco dificulta la compactación. Por otra parte, el uso de un agente aglutinante de la mano con el control de la humedad favorece la compactación y mejoran la resistencia de los pellets; es así que para este estudio el aceite vegetal se eligió como agente aglutinante.

Para controlar la humedad de los materiales molidos esta se determinó empleando una termobalanza. Seguidamente se adicionó agua destilada con ayuda de un atomizador asegurando una distribución uniforme de la misma sobre el aserrín, con el

propósito de alcanzar un contenido de agua del 25% respecto a la masa del aserrín, realizando de manera paralela un mezclado manual.

Posteriormente, a la mezcla humedecida se le adicionó el agente aglutinante (aceite vegetal) de la misma manera como se realizó la adición de agua destilada con el fin de alcanzar un contenido de aglutinante del 8% respecto a la masa del aserrín.

De la mezcla de biomasa acondicionada (aserrín, agua y aceite) se ingresaron lotes de 550g a una pelletizadora modelo AF-120, cuenta con una matriz plana giratoria y dos rodillos que giran sobre ella en sentido a las manecillas del reloj los cuales comprimen el material.

La pelletizadora empleada se caracteriza por ser una tecnología ampliamente utilizada para la fabricación de alimentos balanceados para consumo en aves de corral, porcicultura entre otros; por ser una tecnología ampliamente extendida, en comparación con aquellas utilizadas a gran escala para la fabricación de pellets, fue que se eligió como equipo para la producción de pellets de este estudio.

Es necesario controlar ciertos parámetros durante el proceso de pelletizado tales como: la temperatura del equipo debe estar a 80°C para que se formen los pellets, no se debe saturar la tolva de alimentación y se debe regular la presión de los rodillos.

Finalmente, una vez obtenido los pellets, se enfriaron para conferirle la característica de dureza de tal forma que puedan ser almacenados.

Para la formulación de los pellets se utilizaron cuatro residuos de carpintería provenientes de la canteadora, los cuales provienen de cedro, macuili, una mezcla de ambos; además, se elaboraron pellets a partir de aserrín de pino de la especie (*Pinus Caribaea*) como material de referencia, al ser una de las especies más utilizadas en carpintería en la región sur-sureste de México. Es importante mencionar que los pellets elaborados a partir de la mezcla cedro/macuili provienen de un lote de residuos generados de manera cotidiana en la carpintería, en tanto que, los pellets elaborados a partir de macuili y cedro por separado se elaboraron con el fin de analizar el efecto de cada especie sobre las propiedades de los pellets.



Acondicionamiento de la muestra



Monitoreo de la temperatura del equipo



Pelletización



Enfriamiento de los pellets

Figura 6. Proceso de elaboración de los biocombustibles sólidos (pellets)

## 6.6 Caracterización Final de los Biocombustibles Sólidos (Pellets)

En esta etapa se describe la metodología empleada para la caracterización de los biocombustibles sólidos (pellets) obtenidos.

### 6.6.1 Dimensiones de los pellets

Se seleccionaron 30 pellets de cada formulación para determinar sus dimensiones (diámetro y longitud) con ayuda de un vernier digital marca Steren.

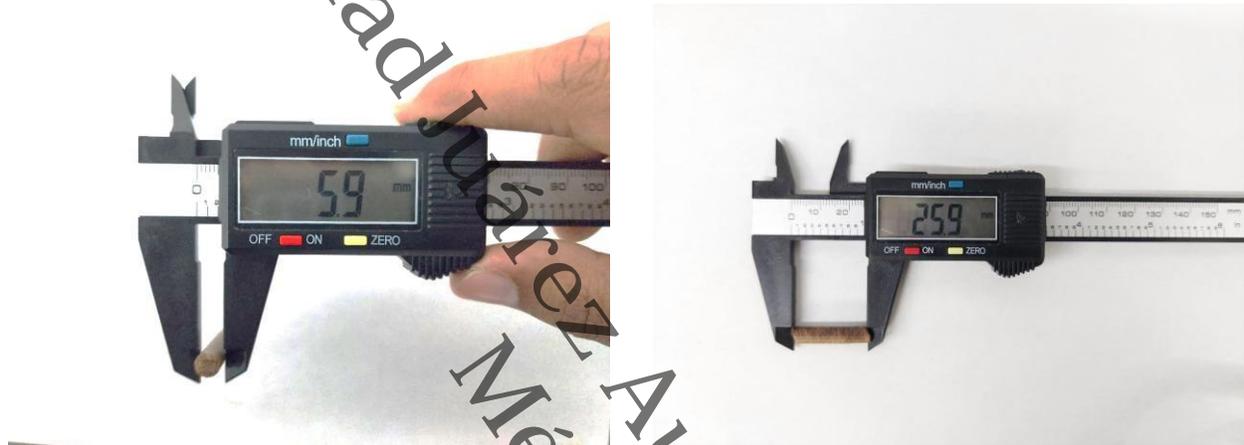


Figura 7. Medición del diámetro y longitud de los pellets

### 6.6.2 Densidad aparente

La densidad aparente se determinó con un vaso de plástico de un volumen de 100ml, se registró el peso total de los pellets que llenaron el vaso.

La densidad aparente se determinó de acuerdo con base a la siguiente ecuación:

$$Dg = \frac{P}{V}$$

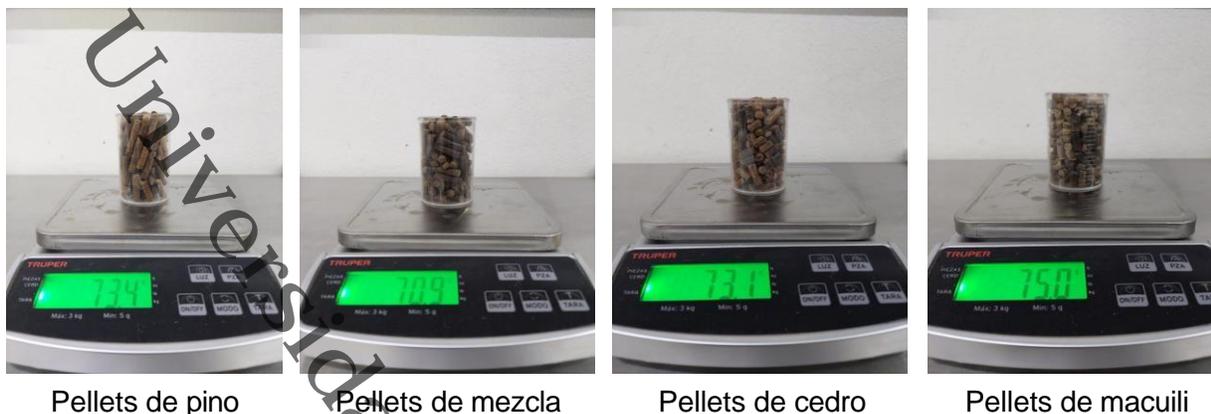
Ecuación 5

Donde:

Dg = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

P = peso de la muestra (g)

V = volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>)



*Figura 8. Medición de la densidad aparente de los pellets*

### 6.6.3 Poder calorífico

El poder calorífico se determinó en una bomba calorimétrica APEX-4, de acuerdo con la norma ISO-18125 (2017). Para ello, fue necesario utilizar 0.8 g de muestra de pellet, que se colocó dentro de una cápsula de acero inoxidable. El análisis del contenido energético se realizó por triplicado, el cual ocurre a partir de una combustión controlada en una camisa adiabática, adicionado 10ml de agua desionizada en condiciones de presurización ( $\leq 3$  Mpa y atmósfera de oxígeno) y el poder calorífico se determina en unidades de kJ/kg.

### 6.6.4 Análisis Termogravimétrico

Las muestras se analizaron en un analizador termogravimétrico Perkin-Elmer TGS-7. Se utilizaron 10mg de muestra. Las muestras se calentaron desde temperatura ambiente hasta 800°C a una velocidad de calentamiento constante de 10 °C/min utilizando una atmósfera de nitrógeno y un caudal de 20 mL/min.

### 6.6.5 Análisis elemental CHONS

El análisis elemental de N, C, H y S a través del Analizador Elemental Flash 2000 está basado en la combustión total de la muestra seguida de una reducción, captura y completa separación y detección de los productos por un detector de conductividad térmica o TCD (Carlo Erba 1968). Las señales eléctricas generadas por el detector son procesadas por la plataforma Eager Xperience, que provee la cuantificación del porcentaje total a partir del uso de estándares de calibración con concentraciones distintas para cada elemento. En la combustión de la muestra los compuestos tanto orgánicos como inorgánicos son convertidos a gases elementales, que después son separados y detectados en un sistema integrado por una columna cromatográfica y un detector con alta sensibilidad (hasta 100 ppm para cada elemento) que lo hace más preciso, evitando hacer ajustes que podrían introducir desviaciones o errores en la determinación.

### 6.6.6 Ensayo de Friabilidad

La friabilidad es la facilidad que tiene un material para poder ser desmoronado o quebrado. Es una variable muy importante en los pellets ya que estos se están manipulando continuamente y chocando unos con otros. Para calcular la friabilidad se utilizaron 100 pellets por cada tratamiento, los pellets se dejaron caer de una altura de 1 metro, una vez que el material se impactó en el suelo firme se contabilizaron los pellets fragmentados y los pellets enteros para obtener un porcentaje de friabilidad FR.

Para calcular el índice  $FR_1$  se utiliza la fórmula siguiente:

$$FR = 100x \frac{NF}{NI}$$

Ecuación 6

Donde:

FR = Porcentaje de friabilidad

NF = Número de pellets al final del ensayo

NI = Número de pellets al inicio del ensayo

El FR nos indica el porcentaje de pellets enteros después de realizar el ensayo de friabilidad, cuanto más cercano sea este al valor de 100 mejor será la muestra.

### 6.6.7 Análisis estadístico del poder calorífico de los biocombustibles sólidos (pellets)

Una vez obtenido los datos se analizaron con el programa Statgraphics Centurion™ v 18.0 y se determinaron que los datos cumplan con los principios de distribución de normalidad, homogeneidad, homocedasticidad, así como también deberá realizarse de análisis de los valores extremos, aplicando un intervalo de confianza del 95%.

El análisis referente a las diferencias significativas de la variable de estudio (poder calorífico) se llevará a cabo con un ANOVA con  $p < 0.05$ .

### 6.6.8 Evaluación de la calidad de los biocombustibles sólidos (pellets)

Con el fin de evaluar el campo de uso de los biocombustibles sólidos, con base a estándares internacionales se empleó la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014. Dicha norma involucra la evaluación de propiedades tales como: diámetro, longitud, humedad, cenizas, poder calorífico, etc. La tabla 3 resume el conjunto de propiedades consideradas para evaluar la calidad de los pellets.

*Tabla 3. Propiedades consideradas para la calidad de los pellets de acuerdo con UNE-EN ISO 17225-2:2014*

Propiedad	Unidad
Diámetro y longitud	mm
Humedad	%
Cenizas	%
Durabilidad mecánica	%
Finos	%
Aditivos	%
Poder calorífico	MJ/kg o kWh/kg
Densidad a granel	kg/m <sup>3</sup>
Composición elemental	%

## 7. Resultados y discusión

En este capítulo se presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos de la caracterización inicial de la biomasa utilizada como materia prima, así como las propiedades finales de los biocombustibles sólidos (pellets).

### 7.1 Caracterización inicial de la biomasa (materia prima)

La tabla 4 nos muestra el resultado de los análisis proximales y de contenido energético de la materia prima empleada para formular los pellets. Las especies de madera comúnmente empleadas en el proceso de carpintería y caracterizadas en esta investigación corresponden a Pino (*Pinus caribaea*), Macuili (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.) y Cedro (*Cedrela Odorata* L.).

**Tabla 4. Análisis proximal y energético de las materias primas utilizadas (residuos de carpintería)**

Especie	Humedad	Cenizas	Materia volátil (%)	Carbono fijo	Poder calorífico (KJ/Kg)
Pino	4.78 ± 0.24	0.17 ± 0.07	90.62 ± 2.31	4.42 ± 0.29	15963 ± 14
Macuili	3.79 ± 0.06	2.86 ± 0.09	91.03 ± 1.18	2.31 ± 0.10	16850 ± 16
Cedro	1.94 ± 0.14	2.86 ± 0.05	87.46 ± 0.14	7.73 ± 0.26	17041 ± 62
Mezcla (C/M)	4.77 ± 0.04	0.90 ± 0.12	87.49 ± 1.16	6.84 ± 0.37	16890 ± 38

Las muestras se realizaron por triplicado

Los resultados presentados son valores promedio con desviación estándar

#### 7.1.1 Humedad

La humedad en la biomasa es un parámetro importante en la elaboración de los biocombustibles, por una parte, está relacionada con la cantidad de agua presente en la biomasa, que influye en su compactación, pero también es un factor crítico que afecta la combustión. Por lo que conocer su contenido expresada en porcentaje en peso, es útil en la toma de decisiones. En este sentido, la biomasa como materia prima presentó porcentajes de humedad de 1.94%, 3.79%, 4.77% y 4.78% para el aserrín de cedro, macuili, mezcla y pino, respectivamente. Estos valores fueron menores al 4.8% reportado por Retana et al. (2019) para aserrín de *Pinus* spp.

Esto se debe a que la materia prima utilizada en la carpintería es secada a la intemperie antes de ser procesada para la elaboración de muebles de madera, por lo cual los residuos generados contienen poca humedad.

Lo anterior indica que no es necesario un proceso de secado para usar estos residuos en la elaboración de biocombustibles densificados.

### **7.1.2 Cenizas**

El contenido de cenizas representa la cantidad de residuo sólido que queda después que la muestra de biomasa se quema por completo; las cenizas tienen como componentes principales óxido de sílice, aluminio, hierro, calcio, magnesio, titanio, sodio y potasio (Vassilev et al. 2013). En este estudio, el contenido de cenizas del aserrín de macuili y cedro tuvieron valores altos de 2.86% (sin embargo, este valor no afecta ya que no hay diferencia significativa) de acuerdo con Serret-Guasch et al. (2016) quienes mencionan que de 0.5 a 2.0% se encuentra el contenido de cenizas para residuos madereros, el valor más bajo fue el obtenido en el aserrín de pino (0.17%), seguido del aserrín de mezcla C/M (0.90%).

El contenido de cenizas es un parámetro que nos ayuda a determinar de manera rápida la calidad del biocombustible, por lo que altos contenidos de ceniza son asociados a una reducción en el contenido energético y pueden afectar negativamente la combustión (Lu et al. 2014).

### **7.1.3 Material volátil**

La materia volátil corresponde a la fracción que se transforma en gas mediante la combustión, la cual se libera cuando la biomasa se calienta mediante la acción pirolítica.

Los valores de material volátil para las cuatro materias primas fueron superiores al 80%, siendo 90.62% el valor más alto para el aserrín de pino, estos valores superan los reportados por Loo y Koppejan (2003) quienes indican que el contenido de material volátil en las biomásas leñosas debe estar entre 76% y 86%.

Los resultados encontrados de material volátil coinciden con reportes previos para diferentes especies maderables, Quiñones (2020) reporta valores de 78.9% a 89.8%

para aserrín de pino y 65.3% a 90.29% para aserrín de diferentes especies (Morales et al. 2020).

#### **7.1.4 Carbono fijo**

El carbono fijo es la fracción que se oxida en fase sólida durante la combustión de la biomasa (Velázquez-Martí. 2018)

Los valores de carbono fijo obtenidos fueron 2.31%, 4.42%, 6.84% y 7.73% para el aserrín de macuili, pino, mezcla (C/M) y cedro, respectivamente, menores al reportado por Serret-Guasch et al. (2016) en un rango de 16.70% a 18.62%. La importancia de este parámetro radica en que es el más importante en términos de energía potencial, ya que altos contenidos de carbono fijo son asociados a altos poderes calóricos Forero-Nuñez et al. (2015).

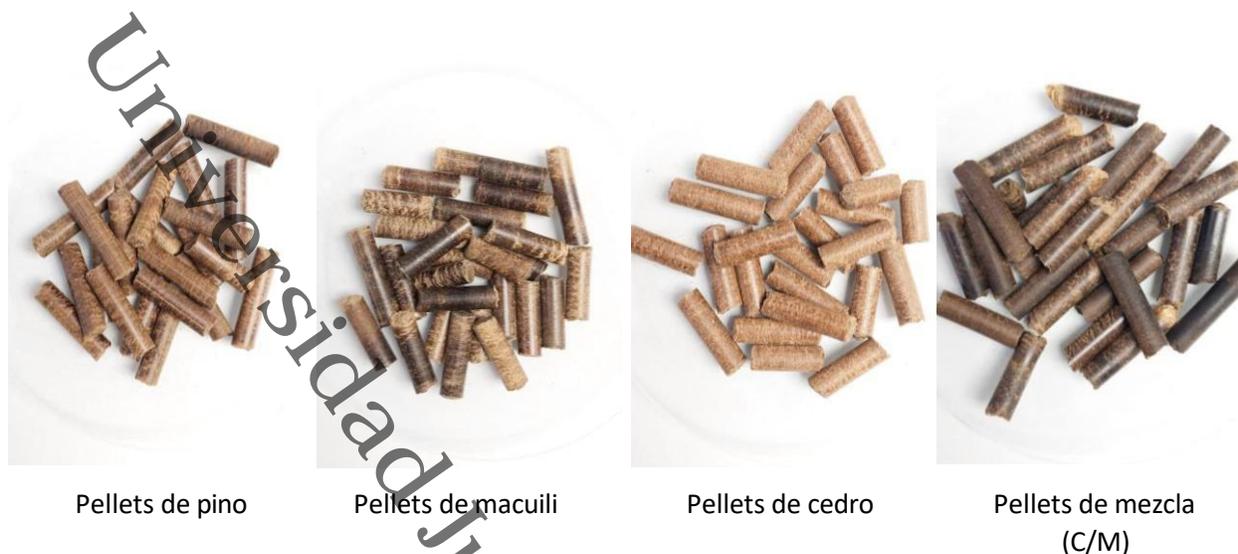
#### **7.1.5 Poder calorífico**

El poder calorífico es una propiedad de gran interés ya que sirve como punto de partida para el uso final de la biomasa, esta propiedad es la cantidad de energía en forma de calor liberada por un material combustible durante su combustión completa (Carbon Trust. 2008).

Un valor aceptable del poder calorífico para las biomásas se encuentra entre 15 000 y 22 000 kJ/kg López-Chalarca (2021), como se observa en la tabla 4, los valores de las cuatro materias primas se encuentran en el rango reportado, siendo el valor más alto de poder calorífico el cedro (17041 kJ/kg), seguido de la mezcla (C/M), el macuili y el pino.

### **7.2 Caracterización final de los biocombustibles sólidos (pellets)**

Posterior a la formulación de los biocombustibles sólidos (pellets) elaborados con base a un contenido de humedad, agente aglutinante y materia prima determinado experimentalmente en el laboratorio, se procedió a evaluar sus propiedades finales. La tabla 5 nos muestra el resultado del análisis energético, físico y mecánico de los biocombustibles sólidos obtenidos.



**Figura 9. Pellets de biomasa obtenidos**

**Tabla 5. Análisis energético, físico y mecánico de los biocombustibles sólidos (pellets)**

Materia prima	Dimensiones (mm)		Densidad g/cm <sup>3</sup>	Poder calorífico (KJ/Kg)	Porcentaje de friabilidad (%)
	Diámetro	Longitud			
Pino	5.9 ± 0.04	24.6 ± 1.62	0.630 ± 0.81	19273 ± 52	72
Macuili	5.8 ± 0.06	20.7 ± 3.02	0.660 ± 0.91	18868 ± 18	91
Cedro	5.9 ± 0.05	19.7 ± 1.47	0.626 ± 0.97	18903 ± 31	90
Mezcla (C/M)	5.8 ± 0.05	23.9 ± 2.35	0.616 ± 0.90	18476 ± 23	92

### 7.2.1 Propiedades físicas

El diámetro de los pellets cumple con la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 (D 6 ± 1 mm, L 3.15-40 mm), teniendo un rango de diámetro de 5.8 para pellets de macuili y mezcla, 5.9 mm para pellets de pino y cedro, y un rango de longitud de 19.7 mm, 20.7, 23.9 mm y 24.6 mm para pellets de cedro, macuili, mezcla y pino, respectivamente.

La densidad aparente varió en el rango de 0.616 a 0.630 g/cm<sup>3</sup>, el valor más bajo fue para los pellets de la mezcla y el valor más alto para los pellets de macuili. Liu et al. (2016) reportaron valores similares de densidad de pellet de pino con un valor de 0.68 g/cm<sup>3</sup>.

La densidad aparente de los pellets es un factor importante para la capacidad de transporte y almacenamiento, y la longitud de los pellets no tiene influencia sobre la densidad aparente (Lehtikangas, 2001).

### 7.2.2 Propiedades energéticas

En la tabla 5, se puede observar que todos los pellets tienen un poder calorífico mayor que el límite establecido por la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 (16,500 KJ/Kg), por lo que los 4 tipos de pellet pueden usarse para aplicaciones residenciales o comerciales, siendo los pellets de pino los que tienen un mayor poder calorífico (19273 kJ/kg).

En la tabla 6, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de varianza del poder calorífico de los pellets.

*Tabla 6. Análisis de varianza del poder calorífico de los pellets*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PELLET	3	1592500	530833	4.60	0.017
Error	16	1848118	115507		
Total	19	3440618			

Se realizó un análisis de varianza entre el poder calorífico de los pellets de aserrín de cedro, aserrín de macuili, aserrín de pino y aserrín de mezcla (C/M), con un nivel de significancia del 5%.

En el análisis de varianza para el poder calorífico puede observarse que de acuerdo al valor p se detectaron diferencias significativas entre el poder calorífico para los pellets evaluados.

El análisis de comparaciones medias de Tukey (tabla 7 y figura 10) muestran que el poder calorífico de los pellets de cedro, macuili y su mezcla no presentan diferencias estadísticamente significativas, esto quiere decir que, no es necesario hacer una separación de los residuos provenientes de la carpintería, sino que, estos pueden ser transformados de la manera en que se generan.

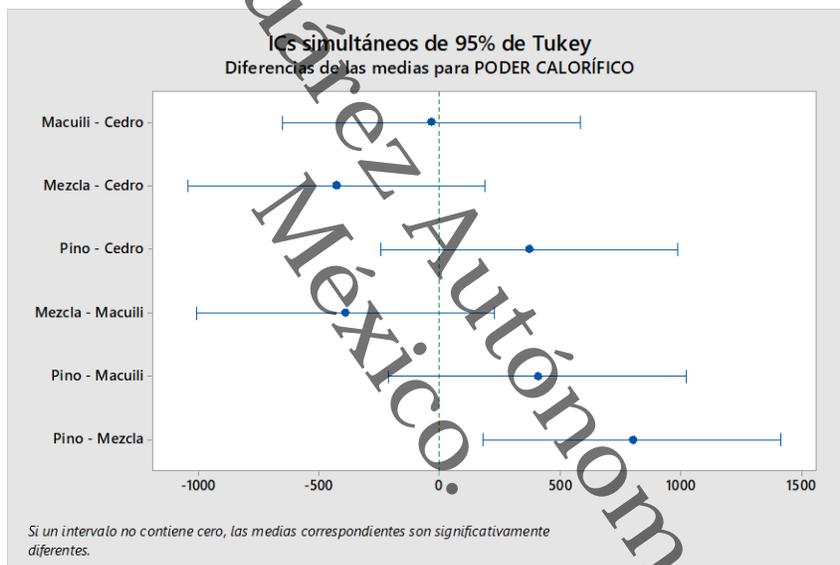
Por otra parte, podemos observar que el poder calorífico de los pellets de pino sí presentó una diferencia significativa respecto a los pellets de aserrín de mezcla, sin

embargo, esta diferencia es de 4.13%, lo que significa que los pellets de mezcla (C/M) tienen características competitivas con pellets de pino.

**Tabla 7. Comparaciones en parejas de Tukey**

PELLET	N	Media	Agrupación
<b>Pino</b>	5	19273	A
<b>Cedro</b>	5	18903	A B
<b>Macuili</b>	5	18867.8	A B
<b>Mezcla</b>	5	18476	B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*



**Figura 10. Comparaciones en pareja de Tukey**

### 7.2.3 Propiedades mecánicas

El índice de friabilidad es un parámetro físico muy importante para evaluar la resistencia que tendrá el material a las condiciones de almacenamiento, transporte, carga, descarga y combustión ya que se estarán manipulando constantemente y chocando unos con otros. Un valor  $FR_1$  entre más cercano sea a 100 nos indica una mayor resistencia al golpeo. Los valores obtenidos fueron de 72%, 90%, 91% y 92% para pellets de pino, cedro, macuili y mezcla, respectivamente.

## 7.2.4 Análisis termogravimétrico

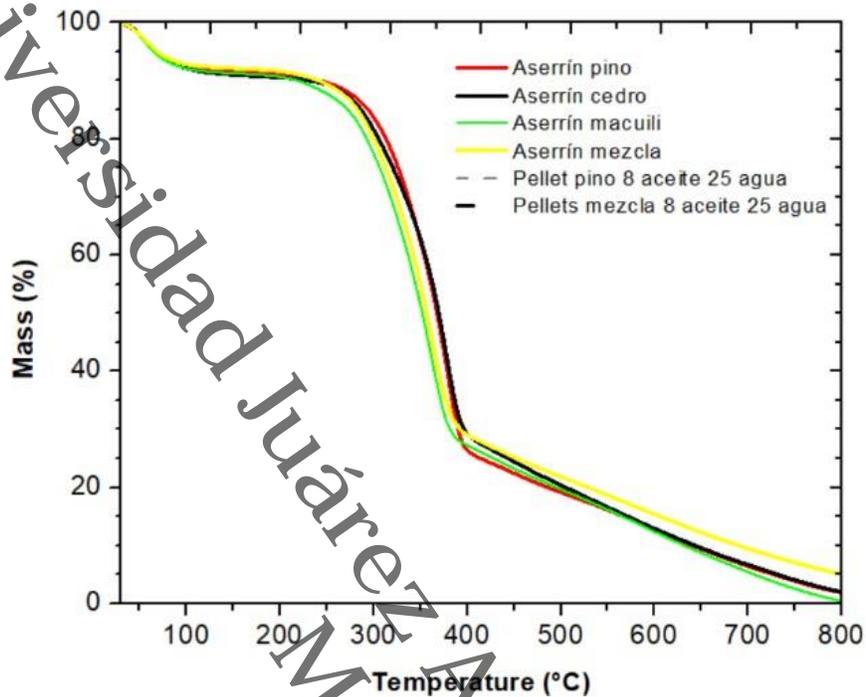


Figura 11. Análisis TGA de las materias primas

En la figura 11 nos muestra el termograma correspondiente a las muestras de biomasa residual utilizada como materia prima para la elaboración de pellets.

A 150-200°C comienza la volatilización, y la tasa de volatilización aumenta a medida que se incrementa la temperatura. Por encima de los 400°C aproximadamente, la mayoría de los volátiles desaparecen y el índice de volatilización disminuye rápidamente. Después de un experimento de TGA, queda una fracción de carbón y materia orgánica. Si se permite la entrada de aire en el sistema después de la volatilización, el carbono se quemará, dejando ceniza como producto final. Cada forma de biomasa produce cantidades ligeramente diferentes de carbón, materia volátil y ceniza (De Jong, 2014)

Como se puede observar en la figura 11 a 100°C hay una pérdida de masa en donde se elimina la humedad de la muestra, a 250-300°C comienza la volatilización de los materiales (aserrín) y esta tasa de volatilización aumenta a medida que se incrementa la temperatura, lo que nos indica que es la temperatura óptima para la descomposición de los materiales, por encima de los 400°C la mayoría de los volátiles desaparecen y la

tasa de volatilización disminuye significativamente. Sin embargo, en el rango de los 400-800°C aún puede observarse cierta descomposición en donde queda un porcentaje de masa residual menor al 10%, siendo que el aserrín de la mezcla es el que mayor porcentaje de biomasa residual genera, y el aserrín de macuili es el que menor porcentaje de biomasa residual genera, el aserrín de cedro y pino al final se comportan de una manera muy similar.

Se puede observar un comportamiento similar del aserrín de pino con el aserrín de cedro en casi todo el proceso de descomposición del material, de igual manera el aserrín de la mezcla durante la temperatura óptima de descomposición se encuentra entre el aserrín de cedro y aserrín de macuili, materiales que la conforman.

De acuerdo con la figura 11, en el rango de los 100°C se pierde alrededor de un 7-8% de masa lo cual representa la eliminación de la humedad de la biomasa, a partir de ahí ocurre la volatilización del material, es decir, la fracción inorgánica hasta llegar a los 800°C, al final solo queda una fracción de carbón pirolítico y material inorgánico.

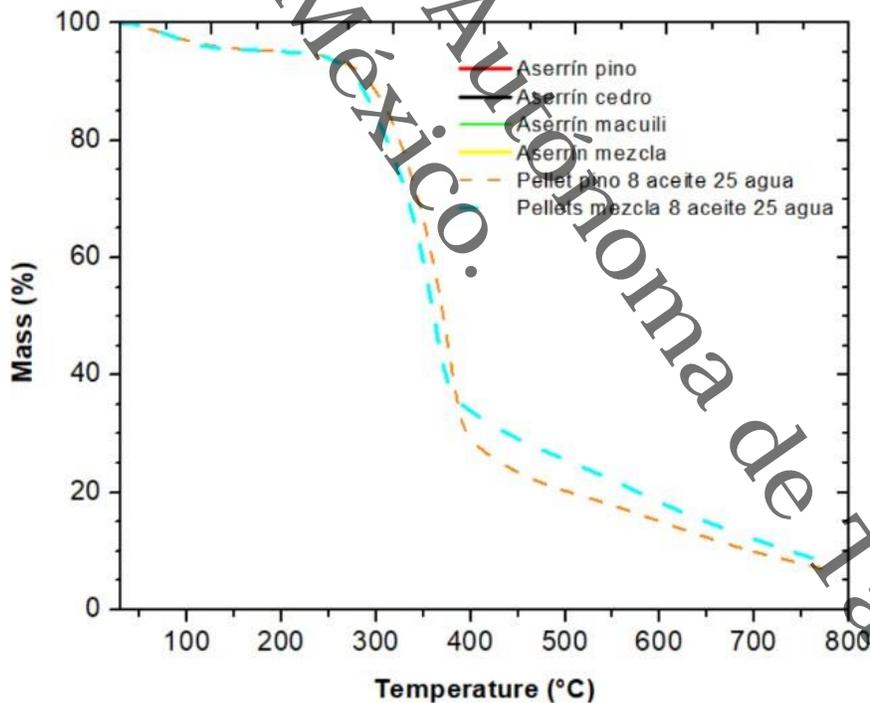


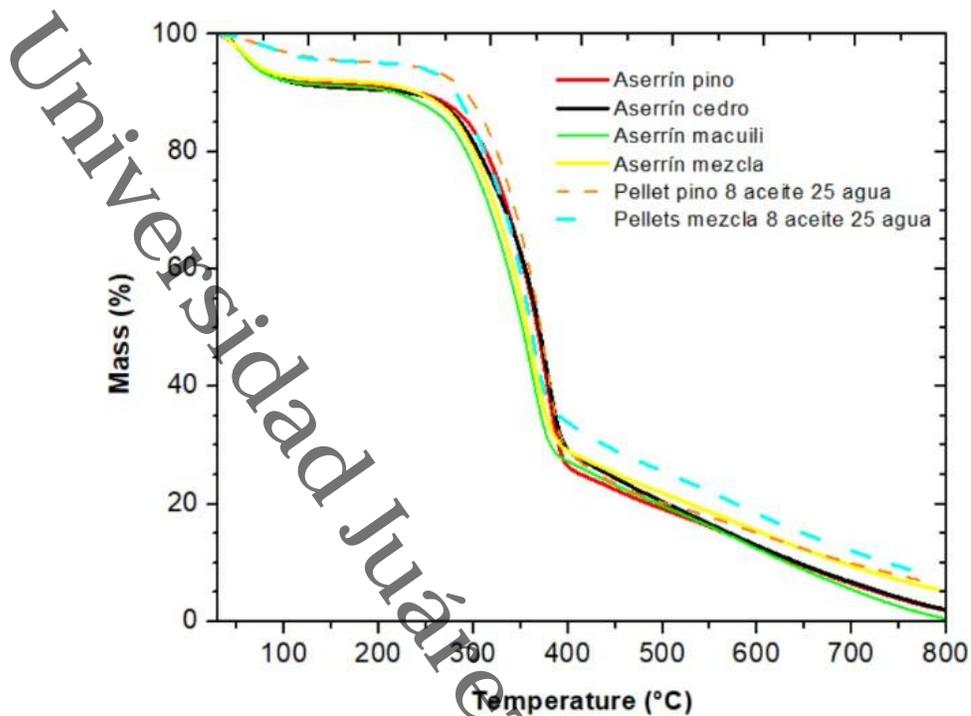
Figura 12. Análisis TGA de los pellets

Hamzah et al, (2018) reportó en el análisis termo gravimétrico de combustión de carbón, pellets de madera y pellets de madera torrefactados. Las curvas TGA representan la pérdida de peso de las muestras a diferentes regiones de temperatura,

donde la pérdida de peso de la biomasa aumenta al aumentar la temperatura de reacción. En la etapa de secado para la temperatura por debajo de 200°C hay un ligero decaimiento del carbón y peso de la biomasa debido a una ligera volatilización. Normalmente la pérdida de peso de las muestras es inferior al 10%.

Después de aumentar la temperatura de 200°C a 500°C, se observa un cambio significativo en la pérdida de peso debido a la descomposición térmica de hemicelulosa, celulosa y lignina. No se produce pérdida de peso significativa cuando la temperatura es superior a 500°C debido principalmente a la descomposición térmica de los componentes.

Como se muestra en la figura 12, a partir de los 250-300°C empieza el proceso de volatilización de los materiales (pellets), en donde hay una pérdida de masa significativa hasta los 400°C aproximadamente, en esta temperatura la mayoría de los volátiles desaparecen y la tasa de volatilización disminuye. Se puede observar que los pellets de pino tienen una mayor degradación en este rango de temperatura a comparación de los pellets de mezcla, quedando alrededor de un 27% y un 34.2% de biomasa residual, respectivamente. Vemos que esta tendencia sigue hasta llegar a los 770°C aproximadamente, en donde al final los pellets de pino generan un menor porcentaje de carbón pirolítico.



**Figura 13. Comparativa de las muestras antes y después del pelletizado**

De acuerdo con la figura 13 se puede observar una diferencia significativa del material antes y después de ser pelletizado, primeramente, los pellets contienen un menor porcentaje de humedad debido a que el proceso de pelletizado se lleva a cabo a temperaturas de 80-150°C. Los pellets tienen una temperatura óptima de descomposición de 250-300°C, similar al aserrín, hasta los 400°C aproximadamente, sin embargo, los pellets de mezcla y pellets de pino generan un porcentaje mayor de carbón pirolítico a comparación de los materiales sin pelletizar. El aserrín de macuili es el material que menor porcentaje de masa residual genera, seguido del aserrín de pino y cedro, siendo los pellets de la mezcla el que tiene mayor porcentaje de masa residual, seguido de los pellets de pino.

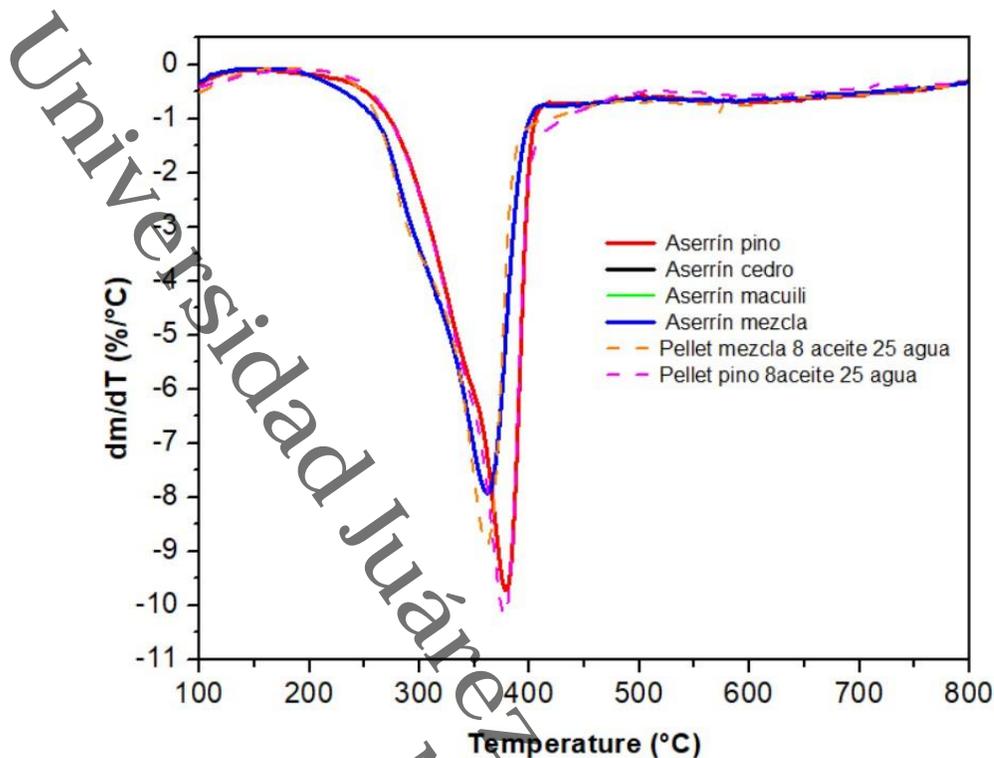


Figura 14. Derivada del TGA

La figura 14 muestra la derivada de la curva del termograma correspondiente a la biomasa residual utilizada como materia prima para la elaboración de los pellets.

Hay dos áreas de pérdida de peso que producen un único pico con una meseta o un hombro situado en la región de baja temperatura. La región de temperatura más baja representa la descomposición de la hemicelulosa, y el siguiente pico de mayor temperatura representa el de la celulosa. Por encima de aproximadamente 400°C, la mayoría de los volátiles desaparecen y la tasa de volatilización disminuye rápidamente. Sin embargo, aún puede observarse cierta volatilización en el intervalo de temperaturas de 400-600°C. Esto se debe a la descomposición de la lignina, que se produce en todo el intervalo de temperaturas, aunque la principal pérdida de peso se produce a temperaturas más altas. Esto significa que la lignina es la principal responsable de la sección de cola plana que puede observarse en todas las especies de madera a temperaturas más altas (De Jong, 2014).

Para las materias primas se puede observar que el primer pico corresponde a la eliminación de la humedad aproximadamente a los 130°C para las 2 materias primas, a los 149°C para los pellets de mezcla y 179°C para los pellets de pino.

El segundo pico que corresponde a la degradación de la hemicelulosa está en los 354°C para el aserrín de pino, 322°C para el aserrín de mezcla, a los 327°C para los pellets de mezcla y 354°C para los pellets de pino.

El tercer pico corresponde a la degradación de la celulosa, para el cual se encuentra a los 361°C para el aserrín de mezcla, 377°C, 378°C para el aserrín de pino, 362°C para los pellets de mezcla y 378°C para los pellets de pino,

El cuarto pico corresponde a la degradación de la lignina, para el cual se encuentra a los 580°C para el aserrín de mezcla y pino, 583°C para los pellets de pino y 567°C para los pellets de mezcla.

### 7.2.5 Análisis elemental

**Tabla 8. Análisis elemental de las materias primas y pellets**

Muestra	PORCENTAJE DE CNHS TOTAL				
	Nitrógeno (%)	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Azufre (%)	Oxígeno
Aserrín C/M	0.199 ± 0.011	47.688 ± 0.971	6.448 ± 0.015	ND	45.666 ± 0.945
Aserrín P	0.095 ± 0.001	48.038 ± 0.101	6.744 ± 0.054	ND	45.124 ± 0.155
Pellet C/M	0.265 ± 0.019	51.416 ± 0.542	6.920 ± 0.107	ND	41.400 ± 0.668
Pellet P	0.148 ± 0.015	51.287 ± 0.706	7.254 ± 0.173	ND	41.311 ± 0.894

ND = no detectado

Los resultados del análisis elemental de las materias primas y los pellets obtenidos se muestran en la tabla 8. Los resultados corresponden a una composición elemental típica de biomasa leñosa. Los biocombustibles sólidos mostraron un aumento de carbono y contenido de nitrógeno, mientras que el contenido de oxígeno disminuyó, que se puede atribuir a la adición de aceite vegetal y el proceso de pelletización. Por otro lado, se encontró un bajo nivel de contenido de nitrógeno para los residuos de aserrín y los biocombustibles sólidos, y el contenido de azufre no hay datos o son valores fuera del límite <0.01% de detección del equipo. Los bajos contenidos de azufre y nitrógeno son propiedades atractivas de los biocombustibles sólidos para ofrecer una alternativa de combustible con un bajo potencial de emisión de contaminantes (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>).

### 7.2.6 Evaluación de la calidad de los biocombustibles sólidos (pellets)

La calidad de los pellets elaborados a partir de residuos de carpintería se determinó con base a las propiedades de la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 (tabla A4). Los resultados muestran que la calidad final de los pellets corresponde a la clase A1, la cual los clasifica para aplicaciones comerciales y residenciales.

En la tabla 9 se muestra la comparativa entre los valores de referencia de calidad de los pellets de acuerdo con la norma española y los valores obtenidos en los pellets de mezcla (C/M).

*Tabla 9. Comparativa de los valores de referencia de UNE-EN ISO 17225-2:2014 con los obtenidos en esta investigación*

	Valor de referencia	Valor obtenido
<b>Diámetro (mm)</b>	$6 \pm 1$	5.8
<b>Longitud (mm)</b>	$3.15 < L < 40$	23.9
<b>Humedad (%)</b>	$\leq 10$	3.41
<b>Cenizas (%)</b>	$< 0.7$	
<b>Poder calorífico (kJ/kg)</b>	16500	18476
<b>Composición elemental (%)</b>	$N < 0.3, S < 0.04$	$N 0.19, S 0$

## Conclusiones

En esta investigación se logró identificar la generación de residuos en forma de viruta y aserrín, lo cual sirvió de base para establecer las formulaciones adecuadas en la elaboración de los biocombustibles sólidos.

Los análisis iniciales realizados en la biomasa residual recuperada evidenciaron un potencial energético atractivo para su posterior tratamiento físico a través de la pelletización.

Así mismo, las técnicas analíticas utilizadas para la caracterización final de los biocombustibles sólidos nos permitieron generar información técnica básica indispensable para la toma de decisión en su aprovechamiento energético.

Los biocombustibles sólidos obtenidos cumplen con la calidad final de los pellets establecidos en la Norma Internacional UNE-EN ISO 17225-2:2014, lo que permite catalogarlos como calidad A1 para aplicaciones comerciales y residenciales, lo cual denota un poder calorífico ( $> 18000$  kJ/kg), con una máxima humedad de 3.41% y un porcentaje de friabilidad del 8%, respectivamente.

Se destaca un incremento en el contenido energético de la materia prima a un pellet de biomasa, cuyos valores aumentaron un 8.6% para el aserrín de mezcla.

Los biocombustibles sólidos obtenidos son viables para ser usados como una alternativa al uso de la leña en las comunidades, en particular, aquella biomasa residual generada por las actividades de carpintería que se desaprovecha y usualmente es acumulada y quemada.

## Perspectivas

- Implementar el análisis de caracterización de la biomasa con estudios estructurales, así como la evaluación del rendimiento energético en diversos equipos.
- Evaluar los gases emitidos por los pellets durante su combustión.
- Profundizar en la caracterización de residuos de diferentes especies maderables de la región.
- Evaluar el potencial energético de los residuos de carpintería.
- Factibilidad técnico-económica de los pellets obtenidos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Referencias

- American Society for Testing and Materials (1998). Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustibles de madera particulados (ASTM E872-82). <https://www.astm.org/e0872-82r19.html>
- American Society for Testing and Materials (2000). Método de prueba estándar para el valor calorífico bruto del carbón y el coque mediante el calorímetro de bomba adiabática (ASTM D-2015-00). <https://www.astm.org/d2015-00.html>
- American Society for Testing and Materials (2010). Análisis proximal de la muestra de análisis de carbón y coque mediante procedimientos instrumentales (ASTM D 5142-04). <https://tienda.aenor.com/norma-astm-d5142-04-035340>
- American Society for Testing and Materials (2021). Método de prueba estándar para análisis químico de carbón de madera (ASTM D1762-84). <https://www.astm.org/d1762-84r21.html>
- Asociación Española de Normalización (2009). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas (UNE-EN 14775). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045971>
- Asociación Española de Normalización (2010). Biocombustibles sólidos, Determinación del contenido de humedad, Método de secado en horno, Parte 3: Prueba estándar de humedad en muestra de análisis general (UNE 14774-3). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045728>
- Asociación Española de Normalización (2014): Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera. (ISO 17225-2). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053748>
- Asociación Española de Normalización (2017). Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico (ISO-18125). <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61517.html?browse=ics>

- Atuesta Boada, L. E., & Sierra Vargas, F. (2015). Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador Técnico*, 79(1), 18. <https://doi.org/10.23850/22565035.133>
- Austrian Standard (2000). Especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza (ÖNORM M 7135). <https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-m-7135-2000-11-01~p1336923>
- Carbon Trust. (2008). Biomass heating. En *A Practical Guide for a Potential Users* (pp. 19-21). [https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/ct\\_biomass\\_heating\\_ctg012\\_2009.pdf](https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/ct_biomass_heating_ctg012_2009.pdf)
- Carrillo Paniagua, T. (2015). Caracterización de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos forestales. Tesis de Licenciatura. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San Jose, Costa Rica. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2015/08/17caracterizaciondepellets.pdf>
- Catalán, H. (2020). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 52(204). <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69611>
- Comitato Termotecnico Italiano (2004). Recomendación: Biocombustibles sólidos. Caracterización de pellets con fines energéticos (CTI R04/05). <https://www.cti2000.it/index.php?controller=pubblicazioni&action=show&id=1597>
- Czekala, W., Bartnikowska, S., Dach, J., Janczak, D., Smurzynska, A., Kozłowski, K., Bugala, A., Lewicki, A., Cieślik, M., Typańska, D., & Mazurkiewicz, J. (2018). The energy value and economic efficiency of solid biofuels produced from digestate and sawdust. *Energy*, 159, 1118-1122. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.090>
- De Jong, W. (2014). Biomass Composition, Properties, and Characterization. En W. De Jong & J. R. Van Ommen (Eds.), *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 36-68). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118916643.ch2>

- Deutsches Institut Fur Normung (1996). Testing of solid fuels-Compressed untreated wood, requeriments and testing (DIN 51731). <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-51731/2842397>
- Forero Nunez, C. A., Jochum, J., & Sierra Vargas, F. E. (2012). Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards. *Environmental biotechnology*, 8. [https://www.researchgate.net/publication/268746279\\_Characterization\\_and\\_feasibility\\_of\\_solid\\_biofuels\\_made\\_of\\_Colombian\\_timber\\_coconut\\_and\\_oil\\_palm\\_residues\\_regarding\\_European\\_standards](https://www.researchgate.net/publication/268746279_Characterization_and_feasibility_of_solid_biofuels_made_of_Colombian_timber_coconut_and_oil_palm_residues_regarding_European_standards)
- Forero Nuñez, C. A., Jochum, J., & Sierra-Vargas, F. E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets: Efecto del tamaño de partícula y la adición de cáscara de cacao en las propiedades de los pellets de aserrín y carbón. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17-23. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>
- Fregoso-Madueño, J. N., Goche-Télles, J. R., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Laredo, R. F., Bocanegra-Salazar, M., & Chávez-Simental, J. A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 243-260. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- Gallardo Izquierdo, A., Carlos Alberola, M., Colomer Mendoza, F. J., Edo-Alcón, N., & Jorge Ortiz, A. N. D. R. E. A. (2020). Design of solid recovered fuels from municipal solid waste and biomass. <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/196438>
- Hamzah, Norfadhilah & Zandi, Mohammad & Tokimatsu, Koji & Yoshikawa, Kunio. (2018). Wood Biomass Pellet Characterization for Solid Fuel Production in Power Generation. 3. <http://www.iasas.org/iasas/journals/ijres>
- International Organization of Standarization (2017). Biocombustibles sólidos: Determinación del poder calorífico (ISO 18125). <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61517.html?browse=ics>

- IRENA (2022), Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2022/Aug/Bioenergy-for-the-Transition>
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., ... Zaehle, S. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8(2), 605-649. <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351-360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)
- Liu, Z., Mi, B., Jiang, Z., Fei, B., Cai, Z., & Liu, X. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable Energy*, 86, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011>
- Loo, S. van, Koppejan, J., & Internationale Energieagentur (Eds.). (2003). *Handbook of biomass combustion and co-firing. Prepared by Task 32 of the Implementing Agreement on Bioenergy* (Reprinted with minor corr). Twente Univ. Press. [https://www.researchgate.net/publication/237079687\\_The\\_Handbook\\_of\\_Biomass\\_Combustion\\_and\\_Cofiring](https://www.researchgate.net/publication/237079687_The_Handbook_of_Biomass_Combustion_and_Cofiring)
- López-Chalarca, L. T., Vega Rodriguez, L. Y., Rendón Colorado, C. D., & Tobón-Rojas, S. (2021). Characterization of wood industry waste for use in different applications. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 104-124. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1>
- Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69, 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.029>
- Martínez-Zurimendi, Pablo, Domínguez-Domínguez, Marivel, Juárez-García, Alfonso, López-López, Leydi M., de-la-Cruz-Arias, Verónica, & Álvarez-Martínez, Jorge. (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de

- Gmelina arborea en Tabasco, México. *Revista fitotecnia mexicana*, 38(4), 415-425. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802015000400010&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400010&lng=es&tlng=es)
- Missagia, B., Corrêa, MFS, Ahmed, I., Krautz, HJ., Ay, P. (2011). Análisis comparativo de la biomasa residual brasileña para la producción de pellets. En: Schmidt, M., Onyango, V., Palekhov, D. (eds) Implementación de la gestión ambiental y de recursos. Springer, Berlín, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-77568-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77568-3_2)
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Applied Sciences*, 10(8), 2933. <https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Ozerova, N. V., Korolev, I. V., Zavyalova, A. A., & Vasilyeva, N. V. (2022). About potential opportunities for the development of solid biofuel production in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1045(1), 012111. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012111>
- Päivi Lehtikangas. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark, *Biomass and Bioenergy*, Volume 20, Issue 5, Pages 351-360, ISSN 0961-9534. <https://www.researchgate.net/publication/222693878> Quality properties of pelletised sawdust logging residues and bark
- Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos para la Producción de Energía (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogota, Colombia: Corporación Ema [https://books.google.com.mx/books/about/Bioenerg%C3%ADa\\_Fuentes\\_conversi%C3%B3n\\_y\\_susten.html?id=YpnxCAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.mx/books/about/Bioenerg%C3%ADa_Fuentes_conversi%C3%B3n_y_susten.html?id=YpnxCAAQBAJ&redir_esc=y)
- Retana, V. D. N., Escobedo-Bretado, M. Á., Reveles, M. Q., Aquino, F. R., & Parra, A. C. (2019). EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE PÉLETS DE

- ASERRÍN DE MADERA DE *Pinus* spp. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 6(2), Article 2. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/121>
- Rutiaga-Quñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J., & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4), 8529-8553. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Samuelsson, R., Thyrel, M., Sjöström, M., & Lestander, T. A. (2009). Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 90(9), 1129-1134. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.007>
- Serret-Guasch, Nurian, Giralt-Ortega, Giselle, & Quintero-Ríos, Mairet. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3), 395-405. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&tlng=es).
- Speight, J. G. (2008). *Synthetic fuels handbook: Properties, process, and performance*. McGraw-Hill. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071490238>
- Swedish Standarts (1999). Especificación de tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan (SS 18 71 20). <https://www.sis.se/en/produkter/petroleum-and-related-technologies/fuels/solid-fuels/ss187120/>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40-76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>
- Velázquez-Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

<https://www.reverte.com/libro/aprovechamiento-de-la-biomasa-para-uso-energetico-81731/>

Wahyudi, Arifudin, M., Annakotapary, D., & Sariningsih, N. (2021). Characteristics of wood pellet from sawdust pelletized with the hand meat grinder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 753(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012017>

Zhijia Liu, Bingbing Mi, Zehui Jiang, Benhua Fei, Zhiyong Cai, Xing'e Liu. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production, *Renewable Energy*, Volume 86, Pages 1-7, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011>.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Anexos

**Tabla A1.** Austria ÖNORM M 7135: Especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza

Austria ÖNORM M 7135: Especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza								
Características	Unidad	Pruebas según sección	Madera comprimida			Corteza comprimida		
			HP 1 Pellets de madera	HP2	HP3 Briquetas de madera	RP1 Pellets de corteza	RP2	RP3 Briquetas de corteza
<b>Diámetro <math>D</math></b>	mm	6.2	$4 \leq D < 10$	$10 \leq D < 40$	$40 \leq D \leq 120$	$4 \leq D < 10$	$10 \leq D < 40$	$40 \leq D < 120$
<b>Longitud</b>	mm	6.2	$\leq 5 \times D$	$\leq 4 \times D$	$\leq 400$	$\leq 5 \times D$	$\leq 4 \times D$	$\leq 400$
<b>Densidad aparente</b>	kg/dm <sup>3</sup>	6.3	$\geq 1.12$	$\geq 1.00$	$\geq 1.00$	$\geq 1.12$	$\geq 1.10$	$\geq 1.10$
<b>Contenido de agua</b>	%	6.5	$\leq 10.0$	$\leq 10.0$	$\leq 10.0$	$\leq 18.0$	$\leq 18.0$	$\leq 18.0$
<b>Contenido de cenizas</b>	%	6.6	$\leq 0.50$	$\leq 0.50$	$\leq 0.50$	$\leq 6.0$	$\leq 6.0$	$\leq 6.0$
<b>Poder calorífico neto</b>	MJ/kg	6.7	$\geq 18.0$	$\geq 18.0$	$\geq 18.0$	$\geq 18.0$	$\geq 18.0$	$\geq 18.0$
<b>Contenido de azufre</b>	%	6.8	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$	$\leq 0.08$	$\leq 0.08$	$\leq 0.08$
<b>Contenido de nitrógeno</b>	%	6.9	$\leq 0.30$	$\leq 0.30$	$\leq 0.30$	$\leq 0.60$	$\leq 0.60$	$\leq 0.60$
<b>Contenido de cloro</b>	%	6.10	$\leq 0.02$	$\leq 0.02$	$\leq 0.02$	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$
<b>Aditivos</b>	%	6.11	$\leq 2.3$	-	-	$\leq 2.3$	-	-
	%	7.3	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$

**Tabla A2.** Alemania DIN 51731, de pellets y briquetas y la DIN Plus que es específica de pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets

Alemania DIN 51731, de pellets y briquetas y la DIN Plus que es específica de pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets		
Propiedades	DIN 51731	DIN Plus
Diámetro (mm)	4 - 10	Especificar
Longitud (mm)	< 5	< 5 * diámetro
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1 – 1.4	> 1.12
Humedad (% masa)	< 12	< 10
Cenizas (% masa)	< 1.5	< 0.5
PCI (MJ/kg)	17.5 – 19.5	> 18
S (% masa)	< 0.08	< 0.04
N (% masa)	< 0.3	< 0.3
Cl (% masa)	< 0.03	< 0.02
As (mg/kg)	< 0.8	< 0.8
Cd (mg/kg)	< 0.5	< 0.5
Cr (mg/kg)	< 8	< 8
Cu (mg/kg)	< 5	< 5
Hg (mg/kg)	< 0.05	< 0.05
Pb (mg/kg)	< 10	< 10
Zn (mg/kg)	< 100	< 100
Densidad aparente	-	Especificar
Durabilidad (% masa)	-	< 2.3
Aditivos (% masa)	-	< 2

**Tabla A3.** Italia CTI R04/05: establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa con fines energéticos. Establece 3 categorías en función del origen.

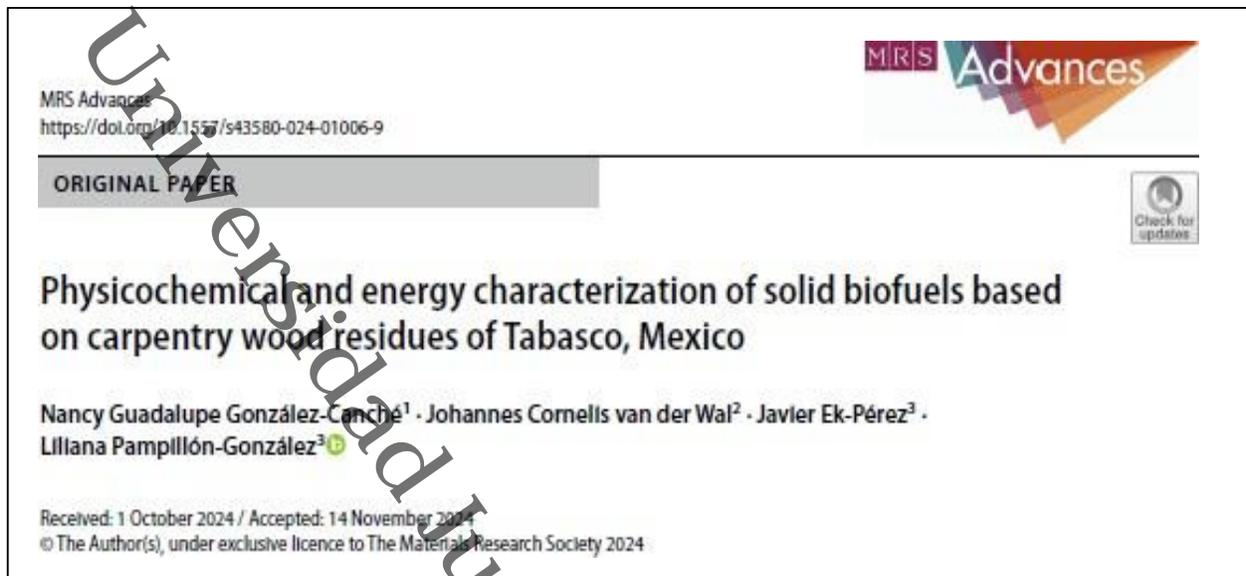
Italia CTI R04/05: establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa con fines energéticos. Establece 3 categorías en función del origen.				
Parámetro	Unidad	Categorías		
		A.1	A.2	A.3
Origen		- Troncos de árboles caducifolios sin corteza. - Troncos de conífera sin corteza. - Madera sin tratar de industrias madereras. - Madera sin corteza y sin tratar tras ser utilizada. - Mezcla de las categorías anteriores.	- Materiales en crudo comprendidos en la categoría A.1. - Biomasa herbácea sin tratar. - Mezcla de las categorías anteriores.	- Materiales en crudo comprendidos en la categoría A.2.
Diámetro (D)	mm	$D = 6 \pm 0.5 - 8 \pm 0.5$	$D = 6 \pm 0.5 - 8 \pm 0.5$	$10 \pm 0.5 \leq D \leq 25 \pm 1.0$
Longitud (L)	mm	$D \leq L \leq 5 \times D$	$D \leq L \leq 5 \times D$	$D \leq L \leq 4 \times D$
Humedad	% peso b.h.	$\leq 10$	$\leq 10$	$\leq 15$
Cenizas	% peso b.h.	$\leq 0.7$	$\leq 1.5$	Indicar
Durabilidad	% peso	$\geq 97.7$	$\geq 95.0$	$\geq 90.0$
Polvo	% peso	$\leq 1.0$	$\geq 1.0$	Indicar
Agentes aglomerantes	% peso	No aceptados		
S	% peso b.h.	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$	Indicar
N	% peso b.h.	$\leq 0.3$	$\leq 0.3$	Indicar
Cl	% peso b.h.	$\leq 0.03$	Indicar	Indicar
Densidad aparente	Kg/m <sup>3</sup>	$\geq 620 - \leq 720$	$\geq 600 - \leq 720$	$\geq 500$
Poder calorífico b.h.	MJ/kg (kcal/kg)	$\geq 16.9 (\geq 4.039)$	$\geq 16.9 (\geq 3.870)$	Indicar

**Tabla A4.** España UNE-EN ISO 17225-2:2014: especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: clases de pellets de madera.

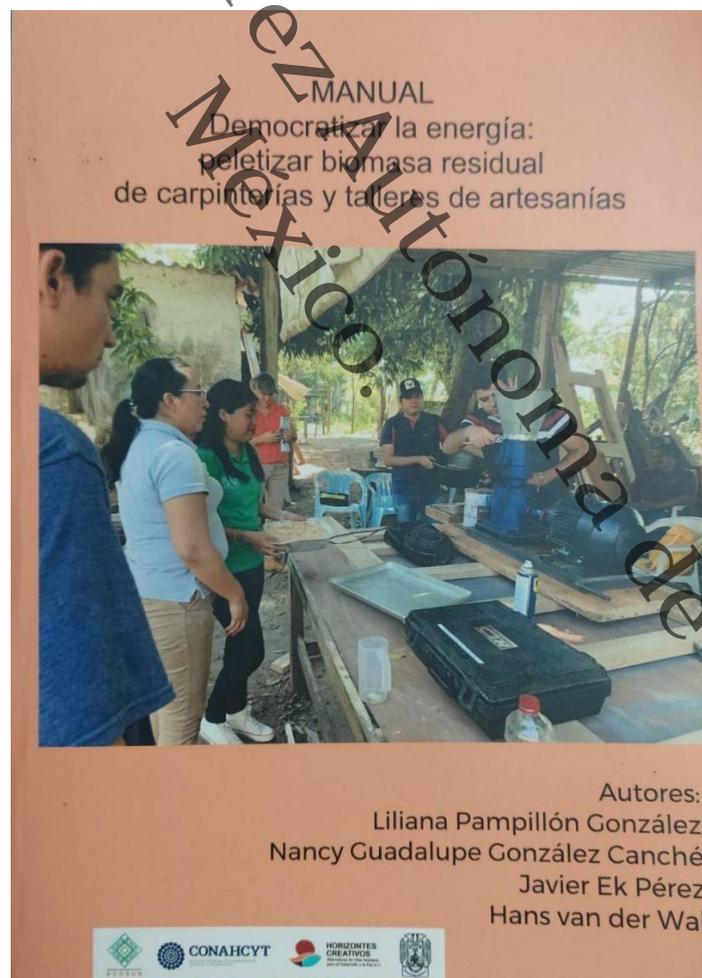
España UNE-EN ISO 17225-2:2014: especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: clases de pellets de madera.			
Clase / propiedad	A1	A2	B
Origen y fuente	Fuste y residuos de madera no tratada químicamente	Los mismos que A1 más árboles enteros sin raíces y restos de corta	Bosque, plantaciones y otra madera virgen; subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera; y madera usada no tratada químicamente
Diámetro y longitud (mm)	D06, $6 \pm 1$ ; $3,15 < L \leq 40$ D08, $8 \pm 1$ ; $3,15 < L \leq 40$		
Humedad (M, %)	M10 $\leq 10$		
Cenizas (%)	A0.7 $\leq 0,7$	A1.2 $\leq 1,2$	A2.0 $\leq 2,0$
Durabilidad mecánica (DU, %)	DU97.5 $\geq 97,5$		DU96.5 $\geq 96,5$
Finos (%)	F1.0 $\leq 1,0$		
Aditivos (%)	$\leq 2$ ; a declarar tipo y cantidad		
Poder cal. Neto (MJ/kg o kWh/kg)	Q16.5 $\geq 16,5$ o Q4.6 $\geq 4,6$		
Densidad a granel (BD, kg/m <sup>3</sup> )	BD600 $\geq 600$		
Composición (%)	N0.3 $\leq 0,3$ S0.04 $\leq 0,04$ Cl0.02 $\leq 0,02$ As $\leq 1$ Cd $\leq 0,5$ Cr $\leq 10$ Cu $\leq 10$ Pb $\leq 10$ Hg $\leq 0,1$ Ni $\leq 10$ Zn $\leq 100$	N0.5 $\leq 0,5$ S0.05 $\leq 0,05$ Cl0.02 $\leq 0,02$ As $\leq 1$ Cd $\leq 0,5$ Cr $\leq 10$ Cu $\leq 10$ Pb $\leq 10$ Hg $\leq 0,1$ Ni $\leq 10$ Zn $\leq 100$	N1.0 $\leq 1,0$ S0.05 $\leq 0,05$ Cl0.03 $\leq 0,03$ As $\leq 1$ Cd $\leq 0,5$ Cr $\leq 10$ Cu $\leq 10$ Pb $\leq 10$ Hg $\leq 0,1$ Ni $\leq 10$ Zn $\leq 100$

**Tabla A5.** Suecia SS 18 71 20: especifica tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan

Suecia SS 18 71 20: especifica tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan			
Propiedades	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diámetro (mm)	< 25 mm	< 25 mm	< 25 mm
Longitud (mm)	< 4 * diámetro	< 5 * diámetro	< 5 * diámetro
Durabilidad (% finos < 3%)	< 0.08	< 1.5	< 1.5
Humedad (% masa)	< 10	< 10	< 12
Cenizas (% masa)	< 0.7	< 1.5	< 1.5
Poder calorífico (MJ/kg)	> 16.9	> 16.9	> 15.1
Azufre (% masa)	< 0.08 %	< 0.08 %	Indicar
Nitrógeno (% masa)		No especificado	No especificado
Cloro (% masa)	< 0.03 %	< 0.03 %	Indicar
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	> 600	> 500	> 500
Fusibilidad de cenizas	Indicar	Indicar	Indicar
Aditivos	Indicar	Indicar	Indicar



**Imagen A1.** Publicación de artículo científico en la revista MRS Advances



**Imagen A2.** Publicación de un libro



Imagen A3. Obtención de primer lugar en concurso estatal Innovando Energía 2023

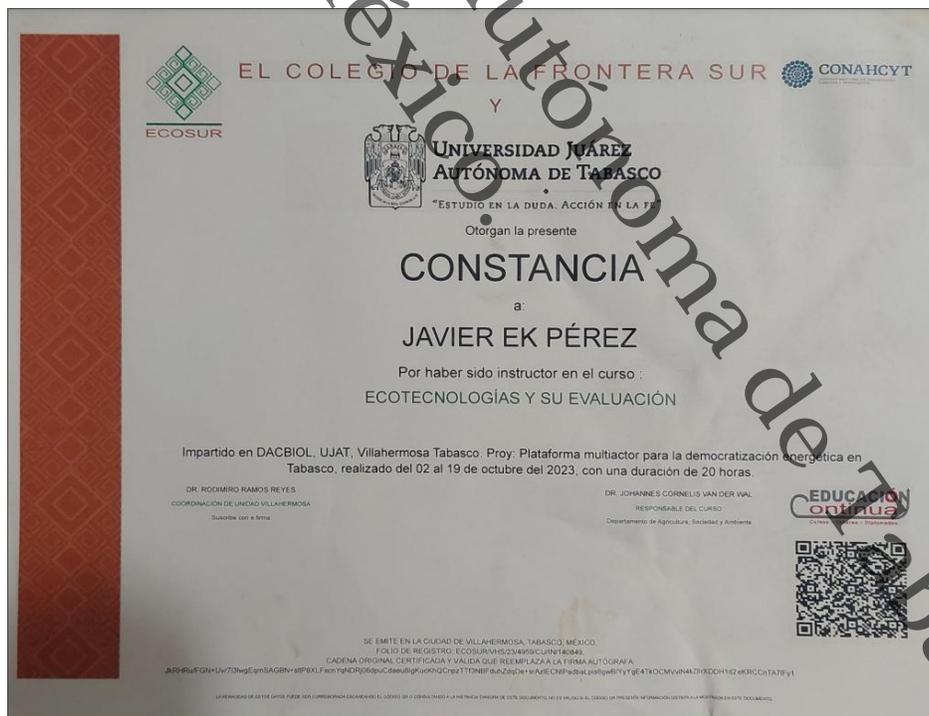


Imagen A4. Participación como instructor en curso sobre Ecotecnologías y su evaluación



*Imagen A5. Elaboración de manual sobre el uso de la pelletizadora*

# PHYSICO-CHEMICAL AND ENERGETIC CHARACTERIZATION OF SOLID BIOFUELS FROM CARPENTRY SAWDUST OF WOOD SPECIES IN TABASCO MEXICO

González-Canché N. G.<sup>1</sup>, Van der Wal H.<sup>1</sup>, Ek-Pérez J.<sup>2</sup>, Burgos-Olan I.<sup>2</sup>, Pampillón-González L.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa, Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente.

<sup>2</sup>División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

\*liliana.pampillon@ujat.mx, nancy.gonzalezcanche@gmail.com

## Introduction

- In Mexico, 40 % of final energy consumption is covered by firewood<sup>1</sup>.
- In Tabasco, almost 50 % of households live in energy poverty<sup>2</sup>. Deforestation, scarcity of good quality firewood, and prices of LP gas are factors that deepen the energy poverty in rural communities<sup>3</sup>.
- Furniture carpentry is an important activity in rural communities of Tabasco, where an important amount of wood residues are generated. Valorization of these lignocellulosic materials to solid biofuels is an attractive approach to offer alternatives to local bioenergetic resources.
- The aim of this work was the physicochemical and energetic characterization of wood residues and solid biofuels of local species as a potential alternative to reduce firewood consumption as well as its implementation in gasifying and combustion ecotechnologies.



## Methodology



## Results

### ANOVA analysis for high heating value of solid biofuels

Source	Freedom degrees	Sum of squares	Mean square	F-Value	p-Value
Solid biofuel	3	1592500	530833	4.60	0.017
Error	16	1848118	115507		
Total	19	3440618			

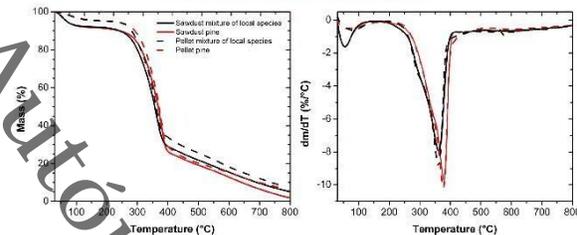
## Results

### Proximal, physical and energy properties

Material type for each wood specie/property	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Tabebuia Rosea</i>	Mixture of local species	<i>Pinus Caribaea</i>	
Sawdust	Moisture (%)	1.94 ± 0.14	3.79 ± 0.06	4.77 ± 0.04	4.78 ± 0.24
	Ash Content (%)	2.86 ± 0.05	2.86 ± 0.09	0.90 ± 0.12	0.17 ± 0.07
	High heating value (kJ/kg)	17041 ± 62	16850 ± 16	16890 ± 38	15963 ± 14
Solid biofuels	Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	0.626 ± 0.97	0.660 ± 0.91	0.616 ± 0.90	0.630 ± 0.81
	Friability (%)	90	91	92	72
	High heating value* (kJ/kg)	18903 ± 31 <sup>A, B</sup>	18868 ± 18 <sup>A, B</sup>	18476 ± 23 <sup>B</sup>	19273 ± 52 <sup>A</sup>

\*Means that do not share letter are significantly different

### Thermogravimetric analysis



### Elemental composition

Material/composition	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O* (%)
Mixture of local species	47.688 ± 0.971	6.448 ± 0.015	0.199 ± 0.011	ND	45.666 ± 0.945
Sawdust <i>Pinus caribaea</i>	48.038 ± 0.101	6.744 ± 0.054	0.095 ± 0.001	ND	45.124 ± 0.155
Mixture of local species	51.416 ± 0.542	6.920 ± 0.107	0.265 ± 0.019	ND	41.440 ± 0.668
Solid biofuel <i>Pinus caribaea</i>	51.287 ± 0.706	7.254 ± 0.173	0.148 ± 0.015	ND	41.311 ± 0.894

\*Obtained by difference (100-C-H-N-S)

## Conclusions

Wood residues from local species of furniture carpentries cooperatives showed attractive properties as raw materials for solid biofuel production, which may contribute to offering alternatives to face energy poverty and to migrate to an energy democratization in the southeast of Mexico.

## Acknowledgments

To CONAHCYT for funding the National Research and Social Inclusion Project (PRONAI) 321029: "Multiactor platform for energetic democratization from solidarity and social economies in urban and rural communities in Tabasco Mexico".

Nancy González Canché acknowledges to CONAHCYT for the postdoctoral fellowship granted.

To furniture carpenters collective "Bacho Carpintería" whose provided the raw materials from this work.

## References

- M. Serrano-Medrano, A. Ghilardi, and O. Masera, "Fuelwood use patterns in Rural Mexico: a critique to the conventional energy transition model," *Hist. Agrar. e Hist. Rural*, vol. 77, pp. 81–104, 2019, doi: 10.26882/hist.agrar.077094s.
- R. García-Ochoa and B. Graizbord, "Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional," *Econ. Soc. y Territ.*, vol. 16, no. 51, p. 289, 2016, doi: 10.22136/est02016465.
- H. van der Wal et al., "Ensamblaje metodológico transdisciplinario para abordar la pobreza y democratización energéticas en Tabasco, México," in *Investigación colaborativa desde la diversidad Entrotojando experiencias y reflexiones en la frontera sur de México*, 2024, pp. 87–108.

**Tabla A10. Anexo 7 Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional**

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
<b>Título de Tesis:</b>	Obtención de biocombustible sólido a partir de residuos de carpintería como alternativa energética en tabasco
<b>Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:</b>	Javier Ek Pérez
<b>ORCID:</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0005-4519-6515">https://orcid.org/0009-0005-4519-6515</a>
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>En el mundo se generan una gran cantidad de residuos cuyo manejo o disposición final aún representa un gran desafío. Unos de estos residuos son los generados en actividades como la carpintería, en forma de aserrín, viruta y polvo. El manejo inadecuado de estos residuos como su combustión tiene un impacto negativo al ambiente y a la salud pública. Una alternativa atractiva para su gestión es su valorización en aplicaciones bioenergéticas.</p> <p>El objetivo de este trabajo fue elaborar y caracterizar un biocombustible sólido (pellet) a partir de residuos de carpintería (aserrín de <i>Cedrela odorata</i> L. y aserrín de <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC y una mezcla de ambos),</p>

	<p>con características comparables con los estándares internacionales.</p> <p>La metodología llevada a cabo consistió en la determinación de las propiedades proximales, energéticas y fisicoquímicas según normas ASTM y UNE-EN, así como termogravimetría (TGA), y el análisis elemental. Se comparó la calidad de los pellets según la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 para localizar el campo de aplicación de estos biocombustibles.</p> <p>Los resultados muestran que los pellets elaborados a partir de mezcla de aserrín, poseen las mejores propiedades en cuanto a poder calorífico (18476 KJ/Kg), por encima de los valores de (16,500 KJ/Kg). Con respecto a la norma de calidad de los pellets, los clasifica como de uso residencial o comercial presentando bajos contenidos de humedad, una densidad aparente de 0.616 g/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de friabilidad del 90%, lo cual favorece su manipulación y logística.</p>
<p><b>Palabras claves de la Tesis:</b></p>	<p>Pellets, aserrín, bioenergía, carpintería</p>
<p><b>Referencias citadas:</b></p>	<p>American Society for Testing and Materials (1998). Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustibles de madera particulados</p>

<p style="text-align: center; transform: rotate(-45deg); opacity: 0.5;">Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p>(ASTM E872-82).  <a href="https://www.astm.org/e0872-82r19.html">https://www.astm.org/e0872-82r19.html</a></p> <p>American Society for Testing and Materials (2000). Método de prueba estándar para el valor calorífico bruto del carbón y el coque mediante el calorímetro de bomba adiabática (ASTM D-2015-00).  <a href="https://www.astm.org/d2015-00.html">https://www.astm.org/d2015-00.html</a></p> <p>American Society for Testing and Materials (2010). Análisis proximal de la muestra de análisis de carbón y coque mediante procedimientos instrumentales (ASTM D 5142-04).  <a href="https://tienda.aenor.com/norma-astm-d5142-04-035340">https://tienda.aenor.com/norma-astm-d5142-04-035340</a></p> <p>American Society for Testing and Materials (2021). Método de prueba estándar para análisis químico de carbón de madera (ASTM D1762-84).  <a href="https://www.astm.org/d1762-84r21.html">https://www.astm.org/d1762-84r21.html</a></p> <p>Asociación Española de Normalización (2009). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas (UNE-EN 14775).  <a href="https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045971">https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045971</a></p> <p>Asociación Española de Normalización (2010). Biocombustibles sólidos, Determinación del contenido de humedad, Método de secado en horno,</p>
--	---

<p>Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p>Parte 3: Prueba estándar de humedad en muestra de análisis general (UNE 14774-3).  <a href="https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045728">https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045728</a></p> <p>Asociación Española de Normalización (2014): Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera. (ISO 17225-2).  <a href="https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053748">https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053748</a></p> <p>Asociación Española de Normalización (2017). Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico (ISO-18125).  <a href="https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61517.html?browse=ics">https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61517.html?browse=ics</a></p> <p>Atuesta Boada, L. E., &amp; Sierra Vargas, F. (2015). Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. <i>Informador Técnico</i>, 79(1), 18.  <a href="https://doi.org/10.23850/22565035.133">https://doi.org/10.23850/22565035.133</a></p> <p>Austrian Standard (2000). Especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza (ÖNORM M 7135).  <a href="https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-m-7135-">https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-m-7135-</a></p>
---	---

<p>Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p><a href="https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2021.204.69611">2000-11-01~p1336923</a></p> <p>Carbon Trust. (2008). Biomass heating. En A Practical Guide for a Potencial Users (pp. 19-21). <a href="https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/ct_biomass_heating_ctg012_2009.pdf">https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/ct_biomass_heating_ctg012_2009.pdf</a></p> <p>Carrillo Paniagua, T. (2015). Caracterización de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos forestales. Tesis de Licenciatura. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San Jose, Costa Rica. <a href="https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2015/08/17caracterizaciondepellets.pdf">https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2015/08/17caracterizaciondepellets.pdf</a></p> <p>Catalán, H. (2020). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. <i>Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía</i>, 52(204). <a href="https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2021.204.69611">https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2021.204.69611</a></p> <p>Comitato Termotecnico Italiano (2004). Recomendación: Biocombustibles sólidos. Caracterización de pellets con fines energéticos (CTI R04/05). <a href="https://www.cti2000.it/index.php?contro">https://www.cti2000.it/index.php?contro</a></p>
---	--

<p style="text-align: center; transform: rotate(-45deg); opacity: 0.5;">Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p><a href="#">ller=pubblicazioni&amp;action=show&amp;id=15975</a></p> <p>Czekała, W., Bartnikowska, S., Dach, J., Janczak, D., Smurzyńska, A., Kozłowski, K., Bugała, A., Lewicki, A., Cieślik, M., Typańska, D., &amp; Mazurkiewicz, J. (2018). The energy value and economic efficiency of solid biofuels produced from digestate and sawdust. <i>Energy</i>, 159, 1118-1122. <a href="https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.090">https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.090</a></p> <p>De Jong, W. (2014). Biomass Composition, Properties, and Characterization. En W. De Jong &amp; J. R. Van Ommen (Eds.), <i>Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future</i> (1.<sup>a</sup> ed., pp. 36-68). Wiley. <a href="https://doi.org/10.1002/9781118916643.ch2">https://doi.org/10.1002/9781118916643.ch2</a></p> <p>Deutsches Institut Fur Normung (1996). Testing of solid fuels-Compressed untreated wood, requeriments and testing (DIN 51731). <a href="https://www.dinmedia.de/de/norm/din-51731/2842397">https://www.dinmedia.de/de/norm/din-51731/2842397</a></p> <p>Forero Nunez, C. A., Jochum, J., &amp; Sierra Vargas, F. E. (2012). Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European</p>
--	--

<p style="text-align: center; transform: rotate(-45deg); opacity: 0.5;">Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p>standards. <i>Environmental biotechnology</i>, 8.</p> <p><a href="https://www.researchgate.net/publication/268746279">https://www.researchgate.net/publication/268746279</a> <u>Characterization and feasibility of solid biofuels made of Colombian timber coconut and oil palm residues regarding European standards</u></p> <p>Forero Nuñez, C. A., Jochum, J., &amp; Sierra-Vargas, F. E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets: Efecto del tamaño de partícula y la adición de cáscara de cacao en las propiedades de los pellets de aserrín y carbón. <i>Ingeniería e Investigación</i>, 35(1), 17-23.</p> <p><a href="https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157">https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157</a></p> <p>Fregoso-Madueño, J. N., Goche-Télles, J. R., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Laredo, R. F., Bocanegra-Salazar, M., &amp; Chávez-Simental, J. A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. <i>Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente</i>, 23(2), 243-260.</p> <p><a href="https://doi.org/10.5154/r.ichscfa.2016.06.040">https://doi.org/10.5154/r.ichscfa.2016.06.040</a></p> <p>Gallardo Izquierdo, A., Carlos Alberola, M., Colomer Mendoza, F. J., Edo-Alcón, N.,</p>
--	---

<p style="text-align: center; transform: rotate(-45deg); opacity: 0.5;">Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p>&amp; Jorge Ortiz, A. N. D. R. E. A. (2020). Design of solid recovered fuels from municipal solid waste and biomass. <a href="https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/196438">https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/196438</a></p> <p>Hamzah, Norfadhilah &amp; Zandi, Mohammad &amp; Tokimatsu, Koji &amp; Yoshikawa, Kunio. (2018). Wood Biomass Pellet Characterization for Solid Fuel Production in Power Generation. 3. <a href="http://www.ias.org/ias/journals/ijres">http://www.ias.org/ias/journals/ijres</a></p> <p>International Organization of Standardization (2017). Biocombustibles sólidos: Determinación del poder calorífico (ISO 18125). <a href="https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61517.html?browse=ics">https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61517.html?browse=ics</a></p> <p>IRENA (2022), Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <a href="https://www.irena.org/Publications/2022/Aug/Bioenergy-for-the-Transition">https://www.irena.org/Publications/2022/Aug/Bioenergy-for-the-Transition</a></p> <p>Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthony, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., ... Zaehle, S. (2016). Global Carbon Budget 2016.</p>
--	---

<p style="text-align: center; transform: rotate(-45deg); opacity: 0.5;">Universidad Juárez Autónoma de México.</p>	<p><i>Earth System Science Data</i>, 8(2), 605-649. <a href="https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016">https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016</a></p> <p>Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. <i>Biomass and Bioenergy</i>, 20(5), 351-360. <a href="https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1">https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1</a></p> <p>Liu, Z., Mi, B., Jiang, Z., Fei, B., Cai, Z., &amp; Liu, X. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. <i>Renewable Energy</i>, 86, 1-7. <a href="https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011">https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011</a></p> <p>Loo, S. van, Koppejan, J., &amp; Internationale Energieagentur (Eds.). (2003). <i>Handbook of biomass combustion and co-firing: Prepared by Task 32 of the Implementing Agreement on Bioenergy</i> (Reprinted with minor corr). Twente Univ. Press. <a href="https://www.researchgate.net/publication/237079687_The_Handbook_of_Biomass_Combustion_and_Cofiring">https://www.researchgate.net/publication/237079687_The_Handbook_of_Biomass_Combustion_and_Cofiring</a></p> <p>López-Chalarca, L. T., Vega Rodríguez, L. Y., Rendón Colorado, C. D., &amp; Tobón-Rojas, S. (2021). Characterization of wood industry waste for use in different applications. <i>Ingeniería y Desarrollo</i>, 38(1), 104-124.</p>
--	---

<https://doi.org/10.14482/inde.38.1.691>.

1

Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69, 287-296.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.029>

Martínez-Zurimendi, Pablo, Domínguez-Domínguez, Marivel, Juárez-García, Alfonso, López-López, Leydi M., de-la-Cruz-Arias, Verónica, & Álvarez-Martínez, Jorge. (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de Gmelina arborea en Tabasco, México. *Revista fitotecnica mexicana*, 38(4), 415-425.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802015000400010&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400010&lng=es&tlng=es)

Missagia, B., Gorrêa, MFS, Ahmed, I., Krautz, HJ., Ay, P. (2011). Análisis comparativo de la biomasa residual brasileña para la producción de pellets. En: Schmidt, M., Onyango, V., Palekhov, D. (eds) Implementación de la gestión ambiental y de recursos. Springer, Berlín, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-77568-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77568-3_2)

Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M.,

López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quñones, J. G. (2020). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Applied Sciences*, 10(8), 2933.

<https://doi.org/10.3390/app10082933>

Ozerova, N. V., Korolev, I. V., Zavyalova, A. A., & Vasilyeva, N. V. (2022). About potential opportunities for the development of solid biofuel production in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1045(1), 012111.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012111>

Päivi Lehtikangas. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark, *Biomass and Bioenergy*, Volume 20, Issue 5, Pages 351-360, ISSN 0961-9534.

[https://www.researchgate.net/publication/222693878\\_Quality\\_properties\\_of\\_pelletised\\_sawdust\\_logging\\_residues\\_and\\_bark](https://www.researchgate.net/publication/222693878_Quality_properties_of_pelletised_sawdust_logging_residues_and_bark)

Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos para la Producción de Energía (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogota, Colombia: Corporación Ema

[https://books.google.com.mx/books/about/Bioenerg%C3%ADa\\_Fuentes\\_con\\_versi%C3%B3n\\_y\\_susten.html?id=YpnxCAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.mx/books/about/Bioenerg%C3%ADa_Fuentes_con_versi%C3%B3n_y_susten.html?id=YpnxCAAQBAJ&redir_esc=y)

Retana, V. D. N., Escobedo-Bretado, M. Á., Reveles, M. Q., Aquino, F. R., & Parra, A. C. (2019). EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE PÉLETS DE ASERRÍN DE MADERA DE *Pinus* spp. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 6(2), Article 2. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/121>

Rutiaga-Quñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J., & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4), 8529-8553. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>

Samuelsson, R., Thyrel, M., Sjöström, M., & Lestander, T. A. (2009). Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 90(9), 1129-1134.

<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.007>

Serret-Guasch, Nurian, Giralt-Ortega, Giselle, & Quintero-Ríos, Mairet. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3), 395-405.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&tlng=es).

Speight, J. G. (2008). *Synthetic fuels handbook: Properties, process, and performance*. McGraw-Hill.

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071490238>

Swedish Standarts (1999). Especificación de tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan (SS 18 71 20).

<https://www.sis.se/en/produkter/petroleum-and-related-technologies/fuels/solid-fuels/ss187120/>

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40-76.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>

<p>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.</p>	<p>Velázquez-Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Editorial Universidad Politécnica de Valéncia.  <a href="https://www.reverte.com/libro/aprovechamiento-de-la-biomasa-para-uso-energetico_81731/">https://www.reverte.com/libro/aprovechamiento-de-la-biomasa-para-uso-energetico_81731/</a></p> <p>Wahyudi, Arifudin, M., Annakotapary, D., &amp; Sariningsih, N. (2021). Characteristics of wood pellet from sawdust pelletized with the hand meat grinder. <i>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</i>, 753(1), 012017. <a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012017">https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012017</a></p> <p>Zhijia Liu, Bingbing Mi, Zehui Jiang, Benhua Fei, Zhiyong Cai, Xing'e Liu. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production, <i>Renewable Energy</i>, Volume 86, Pages 1-7, ISSN 0960-1481, <a href="https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011">https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011</a>.</p>
--	---