



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería  
en Tecnología de la Madera

Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

Tesis

Elaboración de pélets biocombustibles a partir de residuos de poda de aguacate (*Persea americana* Mill.) del municipio de Salvador Escalante, Michoacán, México

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

José Alberto Soria González

Director de tesis:

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Co-director de tesis:

Dr. Raúl Jesús Tauro (ENES Morelia, UNAM)

Morelia, Michoacán

Junio, 2022.

## Resumen

En el presente trabajo se plantea la revalorización de los residuos de poda de árbol de aguacate como fuente alternativa de biomasa para la producción de biocombustibles sólidos densificados en forma de pélets, con fines energéticos. En México, el aguacate es uno de los cultivos de árboles frutales más importantes, donde la mayor superficie cultivada la ocupa el estado de Michoacán con alrededor de 175,000 ha, de las cuales cerca de 16,500 ha las ocupa el municipio de Salvador Escalante, ubicándose como cuarto lugar en cuanto a superficie cultivada en el estado. Los residuos generados tras la poda de este cultivo no tienen una gestión apropiada, por lo que lejos de representar un beneficio, su manejo implica costos adicionales y contaminación ambiental cuando estos son quemados. En este estudio, se determinaron las principales propiedades físicas, químicas y energéticas de la biomasa producida en la poda del aguacate para su aprovechamiento energético: análisis proximal, poder calorífico superior, composición elemental, microanálisis de cenizas, composición química básica (contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles) y de manera complementaria fue realizado un análisis termogravimétrico (TGA) para analizar el comportamiento de descomposición termoquímica de la biomasa. Posteriormente se elaboraron pélets con y sin fécula de maíz, a partir de la fracción leñosa de la poda. La calidad de los pélets obtenidos se evaluó con base en los criterios de la norma española EN 17225-2:2014 y el esquema de certificación *ENplus*® para pélets de uso residencial, comercial e industrial. Adicionalmente, se propuso un índice de calidad de pélets (ICP), donde, con base en algunos de los parámetros de calidad más importantes, fueron comparados los pélets obtenidos frente a algunos reportados en la literatura recientemente. Finalmente, se presentó un panorama general en cuanto al uso potencial de los pélets.

**Palabras clave:** restos de poda, aprovechamiento energético, caracterización, biocombustibles sólidos, calidad de pélets.

## Abstract

In the present work, the revaluation of avocado tree pruning residues is proposed as an alternative source of biomass for the production of densified solid biofuels in the form of pellets, for energy purposes. In Mexico, avocado is one of the most important fruit tree crops, where the largest cultivated area is occupied by the state of Michoacán with around 175,000 ha, of which about 16,500 ha are occupied by the municipality of Salvador Escalante, ranking as fourth place in terms of cultivated area in the state. The residues generated after the pruning of this crop do not have an appropriate management, so far from representing a benefit, their management implies additional costs and environmental pollution when they are burned. In this study, the main physical, chemical and energetic properties of the biomass produced in avocado pruning for energy use were determined: proximal analysis, high heating value, elemental composition, ash microanalysis, basic chemical composition (cellulose, hemicellulose, lignin and extractables content) and in a complementary way a thermogravimetric analysis (TGA) was performed to analyze the thermochemical decomposition behavior of the biomass. Subsequently, pellets with and without corn starch were made from the woody fraction of the pruning. The quality of the pellets obtained was evaluated based on the criteria of the Spanish standard EN 17225-2:2014 and the ENplus® certification scheme for pellets for residential, commercial and industrial use. Additionally, a pellet quality index (PQI) was proposed, where, based on some of the most important quality parameters, the pellets obtained were compared to some recently reported in the literature. Finally, an overview of the potential use of pellets was presented.

**Keywords:** pruning residues, characterization, energy use, solid biofuels, pellet quality.



**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**  
**Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera**  
**División de Estudio de Posgrado**

OF. 083/2022.

**Ing. José Alberto Sorla González**  
Egresado de la Maestría en Ciencias  
Y Tecnología de la Madera.  
Presente.

Para su debido cumplimiento, me permito informar a usted, que ha sido aprobado para iniciar su trámite de titulación por medio de la tesis : **"Elaboración de pélets bloccombustibles a partir de residuos de poda de aguacate (*Persea americana* Mill) del municipio de Salvador Escalante, Michoacán, México."**, bajo la dirección del Dr. José Guadalupe Rutlaga Quiñones y Co-dirección con él Dr. Raúl Jesús Tauro.

Sin otro particular por el momento y agradeciendo de antemano la atención a la presente, me despido de usted enviándole un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

Morelia, Mich., 3 de junio de 2022.

**Dr. Crisanto Velázquez Becerra**  
Coordinador de la Maestría de la  
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO  
FITECMA

Edificio "D", Planta Alta, Ciudad Universitaria. Apartado Postal No. 580, Morelia, Michoacán, México.  
Tel: (443) 322 35 00 ext. 3064. Fax: (443) 326 03 79. Correo electrónico: posfitecma.umich@gmail.com

## índice de contenido

<b>1.</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Justificación</b> .....	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>5</b>
4.1.	Objetivo general.....	5
4.2.	Objetivos particulares: .....	5
<b>5.</b>	<b>Marco teórico</b> .....	<b>6</b>
5.1.	La bioenergía .....	6
5.2.	La biomasa.....	6
5.3.	Biocombustibles.....	8
5.3.1.	Biocombustibles sólidos .....	8
5.4.	Composición química de la biomasa lignocelulósica .....	8
5.4.1.	Composición química básica .....	8
5.4.2.	Composición elemental.....	10
5.5.	Combustión de la biomasa.....	10
5.5.1.	Poder calorífico.....	11
5.5.1.1.	Poder calorífico inferior (PCI) .....	12
5.5.1.2.	Poder calorífico superior (PCS) .....	12
5.6.	Peletizado de biomasa.....	12
5.6.1.	Astillado.....	14
5.6.2.	Secado .....	14
5.6.3.	Molienda y tamizado .....	15
5.6.4.	Acondicionamiento .....	15
5.6.5.	Peletizado: técnicas de aglomeración .....	15
5.6.5.1.	Mecanismos de densificación y unión .....	15
5.6.5.2.	Efectos de la temperatura en el peletizado .....	16
5.6.5.3.	Influencia del contenido de humedad en el peletizado .....	17
5.6.5.4.	Tamaño de partícula.....	17
5.6.5.5.	Aditivos como aglutinantes en pélets.....	18
5.7.	Caracterización de pélets biocombustibles y su calidad .....	18
5.8.	Uso de pélets en el contexto global y local.....	20
5.9.	Generalidades sobre <i>Persea americana</i> Mill.....	21
5.9.1.	Manejo de poda.....	21
<b>6.</b>	<b>Antecedentes de la investigación</b> .....	<b>23</b>
<b>7.</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>24</b>
7.1.	Sitio de estudio.....	24
7.2.	Muestreo .....	25
7.3.	Caracterización de biomasa .....	25
7.3.1.	Determinación del porcentaje de corteza en ramas .....	25
7.3.2.	Preparación de muestras .....	26

7.3.3.	Relación entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas .....	27
7.3.4.	Determinación de contenido de humedad total.....	27
7.3.5.	Análisis proximal .....	28
7.3.6.	Determinación del poder calorífico .....	29
7.3.7.	Análisis elemental.....	29
7.3.8.	Microanálisis de cenizas .....	30
7.3.9.	Análisis químico básico .....	30
7.3.10.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	30
7.4.	Proceso de peletizado.....	30
7.4.1.	Reducción de tamaño.....	31
7.4.2.	Secado de aserrín .....	31
7.4.3.	Distribución del tamaño de partícula .....	32
7.4.4.	Obtención de pélets.....	32
7.4.4.1.	Características generales de la fécula de maíz empleada .....	33
7.4.4.2.	Preparación de mezcla.....	33
7.4.5.	Peletizado.....	34
7.4.6.	Cálculo del consumo de energía .....	34
7.4.7.	Balance de materia en el proceso de peletizado.....	35
7.5.	Caracterización de pélets .....	35
7.5.1.	Análisis de dimensiones de pélets .....	35
7.5.2.	Determinación de humedad .....	36
7.5.3.	Determinación de densidad.....	36
7.5.4.	Cálculo de la densidad energética.....	37
7.5.5.	Determinación de la durabilidad mecánica.....	37
7.5.5.1.	Prueba de volteo .....	37
7.5.5.2.	Índice de resistencia al impacto (IRI) .....	38
7.6.	Evaluación de la calidad de pélets .....	38
7.6.1.	Índice de calidad de pélets (ICP) .....	39
7.6.2.	Usos potenciales de los pélets.....	40
7.7.	Análisis estadístico .....	40
<b>8.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>41</b>
8.1.	Caracterización de biomasa .....	41
8.1.1.	Porcentaje de corteza en ramas .....	41
8.1.2.	Relación entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas .....	42
8.1.3.	Determinación de contenido de humedad total.....	43
8.1.4.	Análisis proximal y poder calorífico.....	44
8.1.5.	Análisis elemental.....	47
8.1.6.	Microanálisis de cenizas .....	50
8.1.6.1.	Cenizas en biomasa de aguacate: observaciones de campo .....	52
8.1.7.	Análisis químico básico .....	55
8.1.8.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	57

8.2.	Proceso de peletizado.....	60
8.2.1.	Balance de materia en el proceso de peletizado.....	61
8.2.2.	Cálculo del consumo de energía .....	62
8.3.	Caracterización de pélets .....	63
8.3.1.	Análisis de dimensiones de pélets .....	64
8.3.2.	Determinación de humedad .....	65
8.3.3.	Determinación de densidad.....	66
8.3.4.	Determinación de la durabilidad mecánica.....	67
8.4.	Evaluación de la calidad de pélets .....	69
8.4.1.	Índice de calidad de pélets (ICP) .....	71
8.4.2.	Usos potenciales de los pélets.....	73
<b>9.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>77</b>
<b>10.</b>	<b>Perspectivas y algunas recomendaciones .....</b>	<b>78</b>
<b>11.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>79</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Fuentes de origen de la biomasa con fines energéticos .....	7
<b>Tabla 2</b>	Distribución de tamaño de partícula para obtener pélets de alta calidad.....	17
<b>Tabla 3</b>	Parámetros de calidad más importantes en pélets .....	39
<b>Tabla 4</b>	Análisis proximal y valor calorífico .....	44
<b>Tabla 5</b>	Composición elemental .....	47
<b>Tabla 6</b>	Microanálisis de cenizas .....	50
<b>Tabla 7</b>	Análisis químico básico.....	55
<b>Tabla 8</b>	Distribución de tamaño de partícula.....	60
<b>Tabla 9</b>	Consumo de energía del proceso de molienda .....	62
<b>Tabla 10</b>	Consumo de energía del proceso de peletizado.....	63
<b>Tabla 11</b>	Distribución de longitudes de pélets.....	64
<b>Tabla 12</b>	Análisis de dimensiones de los pélets obtenidos .....	65
<b>Tabla 13</b>	Contenido de humedad final de los pélets obtenidos .....	65
<b>Tabla 14</b>	Densidad de partícula, densidad a granel y densidad energética de los pélets obtenidos.....	66
<b>Tabla 15</b>	Durabilidad mecánica e índice de resistencia al impacto (IRI) .....	67
<b>Tabla 16</b>	Cumplimiento de los parámetros de calidad de los pélets obtenidos según la certificación ENplus y la norma EN 17225-2 (2014).....	70
<b>Tabla 17</b>	Parámetros de calidad empleados para el cálculo del índice de calidad de pélets	72
<b>Tabla 18</b>	Índice de calidad de pélets por parámetro evaluado.....	72

## Índice de gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Porcentaje de corteza por clase diamétrica.....	41
<b>Gráfica 2.</b> Curva de correlación entre el porcentaje de corteza y porcentaje de cenizas ....	43
<b>Gráfica 3.</b> Curva TGA de ramas con corteza .....	57
<b>Gráfica 4.</b> Curva TGA de ramas sin corteza .....	58
<b>Gráfica 5.</b> Curvas TGA-DTG de ramas con y sin corteza y las tres etapas del proceso de conversión térmica identificadas. ....	59
<b>Gráfica 6.</b> Distribución de longitudes de pélets con fécula de maíz (P-CF) .....	69
<b>Gráfica 7.</b> Distribución de longitudes de pélets con fécula de maíz (P-SF).....	69
<b>Gráfica 8.</b> Índice de calidad de pélets: P-CF, P-SF y pélets de referencia. ....	73

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Biomasa densificada en formato de pélets.....	13
<b>Figura 2.</b> Mapa del sitio de estudio .....	24
<b>Figura 3.</b> Determinación del porcentaje de corteza .....	26
<b>Figura 4.</b> Preparación de muestras: clase R.....	26
<b>Figura 5.</b> Preparación de muestras: clase RPH.....	27
<b>Figura 6.</b> Determinación del contenido de humedad total de R y RPH. ....	28
<b>Figura 7.</b> Análisis proximal .....	28
<b>Figura 8.</b> Termobalanza empleada para determinación de humedad. ....	29
<b>Figura 9.</b> Resumen de la determinación del poder calorífico superior (PCS).....	29
<b>Figura 10.</b> Biomasa leñosa colectada procedente de poda de aguacate .....	31
<b>Figura 11.</b> Reducción de tamaño de ramas.....	31
<b>Figura 12.</b> Secado de aserrín. ....	32
<b>Figura 13.</b> Distribución de tamaño de partícula por el método de tamizado.....	32
<b>Figura 14.</b> Mezclado de aserrín y solución de fécula de maíz.....	34
<b>Figura 15.</b> Proceso de peletizado.....	34
<b>Figura 16.</b> Determinación de longitud y diámetro de pélets. ....	35
<b>Figura 17.</b> Determinación de densidad de partícula de pélet.....	36
<b>Figura 18.</b> Determinación de densidad a granel .....	37
<b>Figura 19.</b> Equipo para prueba de volteo.....	38
<b>Figura 20.</b> Disposición de residuos de poda en campo .....	52
<b>Figura 21.</b> Muestras de la clase RPH contaminadas con agroquímicos .....	53
<b>Figura 22.</b> Flor de aguacate en muestras colectadas.....	54
<b>Figura 23.</b> Balance de materia del proceso de peletizado. ....	61
<b>Figura 24.</b> Distribución de longitudes de pélets .....	64

## 1. Introducción

La sustitución del uso de combustibles fósiles por fuentes de energía más amigables con el medio ambiente, es una estrategia que se ha adoptado por muchos países en el mundo y para lo cual se han desarrollado distintas tecnologías que parten del uso de energías renovables, que son: la energía eólica, hidráulica, geotérmica, solar, donde se incluye también a la biomasa. Esta última es la materia orgánica no fosilizada (se excluye al petróleo, carbón mineral y gas natural), ya sea originada en un proceso biológico espontáneo o provocado y que se puede transformar en una sustancia combustible, llamada biocombustible (Velázquez, 2018).

La energía generada en la combustión de un biocombustible se le conoce como bioenergía y esta puede ser obtenida de manera directa en procesos de combustión para obtener calor o bien, a partir del aprovechamiento del calor generado ser transformado en otros tipos de energía, principalmente mecánica y eléctrica. Los biocombustibles suponen una fuente potencial de energía dado que existe una cantidad numerosa de fuentes y tipos de biomasa, que principalmente provienen de sistemas forestales y agrícolas, aunque también pueden provenir de sistemas marinos (Velázquez, 2018).

En la actualidad, la exploración de nuevas fuentes de biocombustibles sólidos se ha orientado hacia el aprovechamiento de los residuos agrícolas y agroindustriales como fuentes potenciales, y ya no sólo centrado en las fuentes forestales. Recientemente, ha cobrado interés el aprovechamiento de residuos de poda de frutales, sin embargo, dado que las propiedades físicas, químicas y energéticas de cada tipo de recurso son distintas, es necesario primero determinar dichas propiedades para poder valorizar su potencial.

En México los residuos agrícolas generados en la poda de árboles frutales, son una fuente importante de biomasa para la producción de biocombustibles sólidos. Los residuos agrícolas en general, sin embargo, si bien pueden proporcionar grandes volúmenes de biomasa aprovechables y con propiedades consistentes, se ven limitados en su aprovechamiento debido a que suelen presentar una baja densidad, lo que se traduce a altos costos de transporte (Bajwa *et al.*, 2018; Martínez-Guido *et al.*, 2019), un difícil almacenamiento, y dado su alto contenido de humedad se vuelve un material inadecuado para su uso directo (Meincken & Tyhoda, 2014; Japhet *et al.*, 2019). Para superar estos inconvenientes inherentes a la biomasa, se ha empleado la tecnología del densificado de la biomasa (pélets o briquetas), cuyo proceso implica utilizar cantidades relativamente pequeñas de energía para aumentar la masa y la densidad energética del material, donde además de reducirse los costos de transporte, podría mejorarse algunas de las propiedades de la materia prima como biocombustible (Abdoli *et al.*, 2018; Bajwa *et al.*, 2018; Japhet *et al.*, 2019).

Con la finalidad de obtener pélets con mejores cualidades se suelen usar aditivos que, como la fécula de maíz, mejoran algunas de las propiedades físicas del pélet, favoreciendo, por ejemplo, a una mayor durabilidad mecánica y la reducción de la humedad final del mismo (Tarasov *et al.*, 2013; García-Maraver & Carpio 2015). No obstante, deben considerarse las restricciones en cuanto al uso de aditivos en pélets, en apego a las normas de calidad. Por lo

anterior, es importante entonces, evaluar la calidad del producto como biocombustible considerando la necesidad de utilizar o no aditivos.

En el presente estudio se evaluó la calidad de la biomasa de podas de árboles de aguacate (*Persea americana* Mill.) como alternativa de aprovechamiento energético, donde, se analizaron los aspectos más importantes entorno a su potencial uso como biocombustible sólido densificado, pélet, para fines energéticos.

## 2. Justificación

El aprovechamiento de residuos agrícolas para la producción de energía, puede representar la reducción de la dependencia del uso de combustibles fósiles y que contribuye a la disminución de la contaminación ambiental (Bajwa *et al.*, 2018).

En la actualidad, no se tiene conocimiento sobre el aprovechamiento de residuos de podas de árboles frutales en México. Aquí, se propone el aprovechamiento de residuos generados de la poda de cultivo de aguacate cuya oferta potencial ha sido estimada para el municipio de Salvador Escalante (perteneciente al estado de Michoacán, México), en un valor aproximado de 27 mil toneladas de biomasa de madera de aguacate en base seca, considerando la poda realizada para el total de superficie cultivada sólo para el año 2011 (Soria-González, 2019). Actualmente, el municipio de Salvador Escalante es uno de los municipios más importantes en cuanto a tamaño de superficie cultivada con aguacate (16,500 ha aprox.) en el estado de Michoacán, principal estado productor de aguacate del país con una superficie cultivada de alrededor de 175,000 ha (SIAP, 2021a). Los residuos de poda se suelen separar en dos fracciones características, por un lado, las ramas (con diámetros que superan los 2.5 cm) que en ocasiones son trasladados hacia las afueras de los huertos a la espera de su degradación, por otro lado, se encuentra la fracción de ramas pequeñas y hojas (ramas con diámetros inferiores a los 2.5 cm), la cual no se considera para el peletizado en este estudio ya que de forma general en el manejo de las podas, suele ser triturada y esparcida en los huertos para su gradual incorporación a los suelos (a manera de compost) (Soria-González, 2019). Sin embargo, la gestión de estos residuos consiste muchas veces en ser quemados, lo que no sólo no genera un beneficio, sino que su gestión implica costos (Soria-González, 2019) y la generación emisiones contaminantes.

La utilización biomasa de poda de aguacate con fines energéticos es una alternativa potencialmente viable de gestión de este tipo de residuos que actualmente no tienen un uso propiamente dicho. La utilización de residuos agrícolas frente a los cultivos energéticos, presenta varias ventajas al evitarse el uso de tierras agrícolas, al no generarse competencia con el sector alimentario (García-Vargas *et al.* 2020) y al producirse menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en su ciclo de vida (Masera-Cerutti *et al.*, 2011; Velázquez, 2018; García-Vargas *et al.* 2020). La forma de aprovechamiento propuesta en este estudio, es mediante el densificado de los residuos para la obtención de pélets, ya que como indican varios autores, los pélets presentan varias ventajas frente al aprovechamiento directo de la biomasa (Abdoli *et al.*, 2018; Bajwa *et al.*, 2018; Japhet *et al.*, 2019). Finalmente, el uso de aditivos como la fécula de maíz es una forma de coadyuvar a la obtención de pélets de mejor calidad, para el cual ha sido demostrada su contribución al mejoramiento de calidad de parámetros físicos y mecánicos (Ståhl, 2012; Ibitoye *et al.*, 2021).

### **3. Hipótesis**

Los pélets producidos a partir de la poda de árboles de aguacate, podrán ser valorizados como una fuente alternativa de aprovechamiento energético de biocombustibles sólidos.

## **4. Objetivos**

### 4.1. Objetivo general

Evaluar la calidad de pélets biocombustibles elaborados a partir poda de árboles de aguacate con y sin fécula de maíz como aditivo.

### 4.2. Objetivos particulares:

- 1) Determinar las características físicas, y propiedades químicas y energéticas de la biomasa
- 2) Elaborar pélets con y sin fécula de maíz como aditivo
- 3) Determinar las características físicas, y propiedades mecánicas de los pélets
- 4) Evaluar la calidad de los pélets en base a estándares internacionales.

## 5. Marco teórico

### 5.1. La bioenergía

Hoy en día aún existe una dependencia importante de la energía obtenida de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón mineral), sin embargo, este tipo de energéticos son finitos y su disponibilidad sigue disminuyendo día a día. Por otro lado, uno de los retos importantes de la humanidad es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen en la combustión de estas fuentes de energía, los cuales contribuyen al incremento de la temperatura de la tierra (Tumuluru, 2020). El conjunto de implicaciones que tiene el consumo de fuentes de energías fósiles, vuelve necesario la exploración de fuentes alternativas, en este sentido, las energías renovables como la energía eólica, hidráulica, geotérmica, solar y la energía proveniente de la biomasa, juegan un rol importante para su gradual sustitución (Mohtasham, 2015; Velázquez 2018).

La bioenergía se define como la energía que se obtiene de la biomasa (Kaltschmitt & Magdowski, 2019). Este tipo de energía puede contribuir a cubrir la demanda energética de diferentes mercados energéticos como la electricidad, la generación de calor y el mercado de combustibles para el transporte. Además, la energía de la biomasa, al menos en algunas áreas, es una alternativa que puede contribuir a la protección del clima y el medio ambiente, y su desarrollo puede crear fuentes de energía para uso local (Schmidhuber & Tubiello, 2007; FAO, 2010).

### 5.2. La biomasa

Según Velázquez (2018) se denomina *biomasa* a aquella materia orgánica no fosilizada, ya sea originada en un proceso biológico espontáneo o provocado. En el contexto energético actual, la biomasa puede ser útil como materia prima para la generación de biocombustibles, que son los productos finales comercializables en el mercado energético que se obtienen a partir de su transformación física, química o microbiológica y que finalmente pueden ser utilizados en procesos de combustión generando calor con un aprovechamiento directo o bien, mediante su conversión poder obtener energía mecánica o eléctrica (Velázquez, 2018). Es debido a su alto potencial de aprovechamiento que ha generado muchas expectativas en la sociedad y en la política (Hartmann, 2019).

Cuando la biomasa se produce de manera sostenible, a este recurso se le conoce como *biomasa moderna* donde se excluye los usos tradicionales como leña e incluye la generación de electricidad y producción de calor, así como la producción de combustibles para el transporte a partir de residuos agrícolas, forestales y desechos sólidos. Por otro lado, la conocida como *biomasa tradicional*, se produce de forma insostenible y es utilizada como una fuente no comercial sino de consumo local o de uso reducido para la cocción de alimentos y con eficiencias que generalmente son muy bajas (Goldemberg & Coelho, 2004).

Existe una numerosa cantidad de fuentes y tipos de biomasa que se originan de la diversidad de sistemas de producción agrícola, de sistemas forestales y sistemas marinos. Estos se pueden agrupar en dos grandes grupos: biomasa procedente de plantaciones energéticas y la biomasa procedente de residuos o restos de actividades humanas (ver Tabla 1). Las plantaciones energéticas tienen como objetivo principal la obtención de materia prima para

su uso como biocombustibles, por su parte, la biomasa procedente de restos o residuos, es aquella que se produce como parte algunos procesos de producción o transformación de otros productos principales con fines de alimentación (Velázquez, 2018), pero que, tras su revalorización puede también ser aprovechado como biocombustible.

**Tabla 1**

*Fuentes de origen de la biomasa con fines energéticos. Tomado de Velázquez (2018).*

<b>Cultivos energéticos</b>	Herbáceos	Cardo, sorgo, miscanto, girasol, soja, maíz, trigo, covada, remolacha, especies C4 agrícolas
	Leñosos	Chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias y especies C4 forestales
<b>Restos y residuos</b>	Restos de cultivos agrícolas	Herbáceos Paja, restos de cereales, restos de cultivos hortícolas Leñosos Poda o eliminación de plantaciones de frutales de hueso y pepita, olivo, vid, cítricos, etc.
	Restos de operaciones silvícolas	Cortas finales, podas, claras, clareos, aperturas de vías y pistas forestales, limpieza de monte para prevención de incendios, catástrofes forestales (incendios)
	Restos de las industrias agroalimentarias	Piel de frutos (cítricos), cáscaras (almendra, cacahuate...), huesos (aceituna), pulpa en industrias de zumo, etc.
	Restos de industrias forestales	Serrines y virutas, polvo de lijado, corteza, tacos y recortes
	Restos de las explotaciones ganaderas	Purines, cama animal, animales fallecidos
	Productos o restos marinos	Algas, conchas, etc.
	Actividades humanas	Residuos alimenticios, papel, otros residuos industriales.

Dentro de las fuentes de residuos forestales podemos encontrar, por ejemplo, residuos de tratamientos silvícolas y de corte de pies maderables. En la industria forestal se puede encontrar residuos de aserraderos y fábricas de pasta y papel. En el caso de residuos agrícolas podemos encontrar restos de podas o rastrojos de cultivos o residuos de industrias agrícolas como bagazos, hollejo, cáscaras, vinazas, huesos, entre otros (Castells, 2012).

Los residuos agrícolas como fuente de biomasa presentan algunas ventajas frente a los cultivos energéticos, ya que, se evita el uso exclusivo de tierras agrícolas para fines energéticos, además, no existe una competencia con el sector alimentario, al tratarse de residuos que se generan como parte del mantenimiento del cultivo, y que no forman parte del proceso productivo, por otro lado, se reduce la contaminación y el riesgo de incendios, se reduce el espacio en vertederos, los costos de producción y de transporte suelen ser menores y cierta medida pueden contribuir al desarrollo rural con la generación de puestos de trabajo (Callejas y Quesada, 2009; Velázquez, 2018). Por lo anterior, podemos plantear un importante potencial de aprovechamiento en los residuos que se generan como parte de las labores de mantenimiento de cultivos frutales. La biomasa proveniente de frutales puede ser

derivada tanto de huertos como de la práctica de horticultura de árboles, arbustos y hierbas frutales (p. ej., tomates y uvas), en este caso son los subproductos de las fuentes de biomasa de frutas las que son aprovechadas y son las resultantes de la manipulación y tratamiento industrial (Tumuluru, 2020), aunque también existen residuos que son el resultado de las actividades de mantenimiento de cultivos, tal como las labores de poda.

### 5.3. Biocombustibles

Los biocombustibles son sustancias combustibles que son transformadas para fines de comercialización o aprovechamiento en el mercado energético y que parten de la transformación de la biomasa ya sea mediante procesos físicos, químicos o microbiológicos (Velázquez, 2018). Los biocombustibles pueden obtenerse en un estado físico distinto, pudiendo ser sólidos, líquidos y gaseosos, lo que determina las diferentes rutas de transformación tecnológica (Hartmann, 2019).

#### 5.3.1. Biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos mejorados son combustibles que se encuentran en un estado físico sólido y son el resultado de un proceso técnico utilizando biomasa como materia prima (Klemm, 2018).

Los biocombustibles o combustibles procedentes de biomasa como parte de su constitución se componen por tres polímeros principalmente: celulosa, hemicelulosa y lignina que de manera general proporcionan a la biomasa más del 95% de la materia seca en plantas, pero también, presentan otro grupo de componentes denominados extractos o extraíbles y los oligoelementos, que como resultado final de la combustión de la biomasa pueden identificarse como cenizas (Hartmann, 2019; Enes *et al.*, 2019). Las características de los materiales como biocombustible dependen de su composición química particular, lo que hace importante su cuantificación ya que de ello dependerá el uso específico y más favorable que se le pueda dar (Enes *et al.*, 2019).

### 5.4. Composición química de la biomasa lignocelulósica

#### 5.4.1. Composición química básica

La composición química de la biomasa lignocelulósica consiste principalmente de tres tipos de polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina (Pettersen, 1984; Fengel & Wegener 1989). Otros componentes que también forman parte la biomasa son: agua, minerales y algunos compuestos extraíbles como terpenos, taninos, ácidos grasos, aceites, y resinas (Fengel & Wegener 1989; Órfão *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2007; Abdoli *et al.*, 2018). En el interés particular de este tipo de biomasa como combustible, conviene también conocer su composición elemental (elementos principales y oligoelementos).

La celulosa es un polímero que se encuentra formando parte constituyente de la biomasa lignocelulósica, siendo el principal componente estructural de las paredes celulares de las plantas proveyendo de estabilidad a la misma gracias a los numerosos enlaces por puentes de hidrógeno inter e intramoleculares (Fengel & Wegener 1989; Pereira *et al.*, 2003; Rowell, 2005; Klemm *et al.*, 2019). Se trata de una molécula que conforma generalmente una fibra cristalina con una porción amorfa dentro de una matriz de lignina y hemicelulosas (Saka, 1993). A nivel molecular, la celulosa es una cadena larga y lineal de moléculas de D-glucosa

que se unen entre por enlaces  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) glucosídicos (Fengel & Wegener, 1989; Saka, 1993; Pereira *et al.*, 2003) y que consta de hasta 10,000 unidades (Pereira *et al.*, 2003; Klemm *et al.*, 2019). Dependiendo de la materia prima se puede encontrar celulosa en porcentajes distintivos encontrándose típicamente entre un 40 y 50 % en madera y del 16 al 41 % en corteza (Klemm *et al.*, 1998; Rowell, 2005). A un nivel microscópico las células de la madera se componen microfibrillas que son haces de celulosa que forman un esqueleto y que son recubiertos, además, por hemicelulosa (Klemm *et al.* 2019).

La hemicelulosa es polímero que, a diferencia de la celulosa, es ramificado y se forma principalmente por xilosa y arabinosa, dos monosacáridos unidos por enlaces  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) glucosídicos, pero que comprende también, aunque en menor proporción, monosacáridos de glucosa, manosa, galactosa, ramnosa, fucosa, ácido galacturónico y ácido glucurónico (Fengel & Wegener 1989; Ebringerová et al., 2005; Hartmann, 2019; Maitra & Maitra, 2020). La estructura de las hemicelulosas puede variar de manera significativa dependiendo de su localización en la pared celular, los tipos de células y especie vegetal. En latifoliadas los valores de hemicelulosa pueden oscilar entre 24 – 40 % mientras que en coníferas el rango se encuentra entre 25 – 35 % (Bajpai, 2020). Los principales componentes de hemicelulosa en las paredes celulares secundarias son polisacáridos de tipo xilanos y comprenden alrededor del 20 – 30% de la biomasa de maderas y plantas herbáceas (Ebringerová *et al.*, 2005).

La lignina es un polímero amorfo y no lineal consistente en un sistema aromático y fenólico de gran complejidad estructural, por lo que es más preciso hablar de ligninas, en plural, para su descripción (Stevanovic & Perrin, 2009). Las moléculas de las ligninas tienen estructuras altamente desorganizadas y aleatorias, rica en anillos aromáticos con grupos fenólicos (Fengel & Wegener 1989; Vanholme *et al.*, 2010), la conformación de dicha estructura contiene muchas unidades fenilpropanoides que son resultado de la polimerización oxidativa de tres tipos de subunidades llamados monolignoles y son: unidad p-hidroxifenil (H), unidad guaiacyl (G) y unidad siringil (S), estas unidades se combinan en diferentes cantidades y patrones de sustitución (Freudenberg & Neish, 1968 citado por Hartmann, 2019; Higuchi, 1990; Lewis & Yamamoto, 1990; dos Santos *et al.*, 1999). El contenido de lignina en la madera puede variar entre el 25 a 35 % en coníferas (Rowell, 2005) y de 18 a 25 % en latifoliadas (Dalimova & Abduazimov, 1994; Bajpai, 2020). Una función que se le atribuye a este componente, es la de agente cementante, ya que aglutina las microfibrillas de celulosa y las estabiliza dentro de la estructura de la planta (Klemm *et al.*, 2019; Hartmann, 2019).

Los compuestos extraíbles, generalmente representan sólo una pequeña proporción de la madera, encontrándose alrededor del 10 %, con excepción de maderas tropicales para las cuales el valor puede ser superior, sin embargo, a pesar de las cantidades suelen ser bajas en una sola especie, los compuestos extraíbles pueden incluir a cientos de moléculas diferentes (Pereira *et al.*, 2003). Los extraíbles son una variedad de compuestos de bajo a mediano peso molecular que pueden ser removidos por extracción con solventes, por lo cual se les da ese nombre (Pereira *et al.*, 2003). La clasificación de estos compuestos puede ser de distintas formas, ya sea en función de su polaridad distinta o respecto al disolvente en el que solubilizan, su organización por familias de rutas biosintética común o bien, por su estructura

química (Pereira *et al.*, 2003). Los compuestos extraíbles encontrados en la madera generalmente son terpenoides, compuestos fenólicos y algunos otros como ácidos grasos, aceites y ceras, así como resinas, azúcares y alcaloides, la región específica de la madera donde suelen encontrarse este tipo de compuestos es el duramen (Pettersen, 1984; Fengel & Wegener, 1989; Pereira *et al.*, 2003). En la corteza principalmente suelen encontrarse taninos hidrolizables y taninos condensables compuestos lipofílicos, terpenoides y otros compuestos fenólicos de bajo peso molecular como lignanos y fenilpropanoides (Sakai, 2000).

Otra forma de describir y entender la composición química de la biomasa es a partir de su composición elemental.

#### 5.4.2. Composición elemental

La composición elemental, rinde la cantidad de elementos químicos que forman el material lignocelulósico; existe poca variación y en general se tiene 50 % de carbono, 43% de oxígeno y 6% de hidrógeno (Fengel & Wegener, 1989). El carbono contenido en la biomasa sólida es el componente más determinante en la liberación de calor por oxidación, seguido del hidrógeno que también proporciona energía por las reacciones de oxidación durante la combustión. El oxígeno por su parte contribuye a este tipo de reacciones (Hartmann, 2019).

Dentro de la composición elemental de la biomasa lignocelulósica se encuentran dos grupos de elementos (Hartmann, 2019): 1) elementos principales, que comprende al carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), que parten de la asimilación de CO<sub>2</sub> y la absorción de H<sub>2</sub>O por parte de las plantas y 2) oligoelementos, que comprende al nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) como los seis nutrientes principales, pero, además, incluye al cloro que no es considerado un nutriente. Por otro lado, existen otros oligoelementos que contienen la biomasa lignocelulósica que figuran como micronutrientes, aunque algunos de ellos pueden ser dañinos para la vida de una planta: silicio (Si), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo), cobalto (Co), plomo (Pb), aluminio (Al), cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel (Ni), mercurio (Hg) o arsénico (As). Ambos grupos son esenciales para el crecimiento de las plantas (Hartmann, 2019).

La composición química básica de la biomasa lignocelulósica ayuda a comprender algunas de las propiedades de interés para su potencial aprovechamiento como biocombustibles sólidos densificados, de igual forma, la composición elemental de dicha biomasa ayuda a entender algunos de los fenómenos ligados al aprovechamiento energético, por ejemplo, la combustión.

#### 5.5. Combustión de la biomasa

La combustión es parte de un proceso de descomposición termoquímica de un material que se lleva a cabo en presencia de oxígeno y temperaturas altas (Christ *et al.*, 2019)

El proceso de conversión termoquímica de la biomasa según Christ *et al.*, (2019), presenta cuatro etapas distintas en una atmósfera gaseosa, donde, la composición química del material orgánico se modifica paso a paso hasta que finalmente los compuestos completamente oxidados se liberan a la atmósfera. A continuación, se describen brevemente las etapas de la conversión termoquímica de la biomasa (Christ *et al.*, 2019):

- *Calentamiento*: es la etapa donde la biomasa se calienta endotérmicamente, es decir, se requiere calor externo. Aquí se presenta la liberación de agua libre a temperatura cercana a los 100°C, y a una temperatura mayor, se libera agua unida a las células de biomasa.
- *Descomposición pirolítica*: aquí las macromoléculas se estimulan térmicamente produciéndose la disociación de enlaces. Los enlaces químicos individuales dentro de los biopolímeros se rompen y destruyen de manera irreversible. En este proceso, se producen fragmentos de macromoléculas más pequeños en forma de gases o vapores. Esta descomposición se presenta aproximadamente entre los 150 y 220 °C y termina en un nivel de temperatura aproximada de 500 °C, resultando un sólido compuesto por carbono (carbón vegetal) y cenizas.
- *Gasificación*: en esta fase, el sólido resultante de la descomposición pirolítica, se transfiere a la fase gaseosa para producir gases combustibles.
- *Oxidación*: los productos generados la descomposición pirolítica, así como los generados en la gasificación, se oxidan completamente con oxígeno bajo liberación de calor, generando como principales productos de reacción CO<sub>2</sub> y vapor de agua.

Un factor importante dentro de los procesos de conversión termoquímica es la atmósfera de gas. Por ejemplo, la fase de descomposición pirolítica tiene lugar casi siempre sin una entrada de oxígeno externa. Sin embargo, las reacciones inducidas por el oxígeno pueden tener lugar debido al oxígeno que se encuentra almacenado dentro de las macromoléculas orgánicas del combustible, es decir, el oxígeno contenido originalmente en la biomasa se libera de sus enlaces durante la descomposición y, por lo tanto, pueden reaccionar (Jones *et al.*, 2014; Christ *et al.*, 2019).

Los procesos de combustión de biomasa deben estar diseñados para llevarse a cabo en condiciones de oxigenación suficiente para producir en la mayor medida posible, una oxidación total del material buscando obtener una combustión energéticamente óptima donde se controle la emisión de humos, monóxido de carbono y otra serie de elementos no combustionados (Fredes, 2014). En un proceso de combustión de biomasa existe una serie de propiedades que determinan tanto las posibilidades como los límites para que se lleve a cabo de una forma determinada una conversión termoquímica. Una de las principales propiedades es el poder calorífico (Hartmann, 2019).

#### 5.5.1. Poder calorífico

El poder calorífico se puede expresar como la cantidad de energía liberada por un material cuando este es quemado en aire. Dicho de otra forma, esta característica es la que determina la cantidad de energía disponible en la biomasa (Velázquez, 2018). Las unidades utilizadas para expresar los valores de poder caloríficos son Kcal/kg o MJ/kg, siendo estas últimas unidades las más ampliamente usadas.

El poder calorífico está relacionado de manera directa con el contenido de humedad, ya que la humedad reduce la eficiencia en la combustión debido a que una gran parte del calor liberado es absorbido por el agua y que genera su evaporación (Velázquez, 2018). Este fenómeno relacionado con el contenido de humedad es lo que vuelve necesario hacer una

diferenciación entre poder calorífico bruto o también llamado poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico neto o también conocido como poder calorífico inferior (PCI) (EN 18125, 2018).

#### 5.5.1.1. Poder calorífico inferior (PCI)

También conocido como poder calorífico neto, es el valor que se toma en cuenta a la hora de determinar el potencial de la biomasa como biocombustible. Se trata del contenido energético de un material donde no se considera el calor latente por la condensación del vapor de agua formado en los gases de combustión (López, 2013; EN 18125, 2018). También se puede definir como el calor específico (entalpía) de combustión del combustible quemado en presencia de oxígeno a presión o volumen constante en condiciones tales que toda el agua de los productos de reacción permanece como vapor de agua (hipotéticamente a una presión de 0.1 MPa) (Hartmann, 2019). En la aplicación práctica, el PCI a presión constante es el que se aproxima mejor a al valor que realmente se puede aprovechar en una caldera de combustión ya sea en una aplicación doméstica o industrial (Velázquez, 2018).

#### 5.5.1.2. Poder calorífico superior (PCS)

El PCS representa la cantidad máxima que, al menos teóricamente puede recuperarse a partir de la combustión de una fuente de biomasa determinada (López, 2013). El PCS o poder calorífico bruto, frente al PCI es el calor específico liberado en la oxidación completa de un combustible cuando considera y utiliza el calor latente de condensación de cualquier vapor de agua en los gases de combustión (López, 2013; Hartmann, 2019).

Frente al poder calorífico neto, el poder calorífico bruto es el calor específico liberado en la oxidación completa de un combustible cuando se considera y utiliza el calor latente por condensación de cualquier vapor de agua en los gases de combustión. Para hacer esto, el gas de combustión debe enfriarse para condensar el vapor de agua. Según la norma EN 18125, (2018) el hecho de que el poder calorífico bruto sea más alto que el poder calorífico neto es por lo que se le conoce ahora a este primero como PCS.

La diferencia, entonces, entre ambos valores térmicos tiene relación con la formación de vapor de agua durante la reacción termoquímica que se da como resultado de reacciones químicas entre el hidrógeno que forma parte del combustible o a partir del agua libre en el biocombustible sólido que se vaporiza. Es por ello que, a partir del porcentaje de hidrógeno contenido en la materia seca se pueden calcular un calor latente de 218.3 J que se relaciona con 1 g de combustible (a una temperatura de los gases de combustión de 25 °C). Por otro lado, en relación al agua libre y la unida a la biomasa, se ha calculado el rendimiento del calor latente específico esto, por punto porcentual de contenido de humedad y que corresponde a un valor de 24.43 J, relacionado con un g de masa del combustible (Hartmann, 2019).

### 5.6. Peletizado de biomasa

Las propiedades físicas de la biomasa varían según la fuente de la que se obtiene. Uno de los principales inconvenientes para el uso directo de la biomasa es el contenido de humedad. Si hablamos de residuos agrícolas, por ejemplo, si bien pueden proporcionar grandes volúmenes de biomasa aprovechables y con propiedades consistentes, se enfrentan a algunas

limitaciones, como: su baja densidad, lo que se traduce a problemas en el transporte como los altos costos del mismo y un difícil almacenamiento (Bajwa *et al.*, 2018; Tumuluru, 2020). Para mejorar las propiedades físicas y poder superar estos inconvenientes inherentes a la biomasa, se puede hacer uso de tecnologías basadas en sistemas de procesamiento mecánico como la trituración y el densificado que son técnicas de uso común que ayudan a mejorar algunas propiedades como la densidad, el tamaño y forma de partícula, y a reducir el contenido general de humedad y que a su vez, facilita en gran medida la logística del transporte, la manipulación, la capacidad de almacenamiento y las propiedades de combustión, esto además, lo vuelve más rentable (Kaliyan & Morey, 2009; Abdoli *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2018; Tumuluru, 2020).

Las formas más usuales de densificado de biomasa es el peletizado y el briquetado. Los sistemas usados en estos procesos ayudan a aumentar la densidad a granel o densidad aparente del material de cuatro a cinco veces del valor inicial (de 40 – 250 kg/m<sup>3</sup> a 550 – 800 kg/m<sup>3</sup>) (Kaliyan & Morey, 2009; Abdoli *et al.*, 2018; Tumuluru, 2020). Un proceso de densificación puede ser considerado de manera general a cualquier proceso que conduzca a la reducción de la densidad física y a un aumento de la densidad energética de un combustible (Abdoli *et al.*, 2018). Además, como resultado de este proceso se obtiene un producto con una mayor homogeneidad al mejorar la regularidad de la forma y el tamaño que vuelven su desempeño en la combustión, más eficiente (Kaliyan & Morey, 2009; Abdoli *et al.*, 2018), tal como es el caso de los pélets como uno de los formatos más populares de densificados (Abdoli *et al.*, 2018) (ver Figura 1).

Las ventajas que tienen los pélets frente a otro tipo de biocombustibles sólidos (leña, astillas, etc.) e inclusive frente a combustibles fósiles, teniendo implicaciones tanto en aspectos de seguridad, ecológicos o aspectos económicos.



**Figura 1.** Biomasa densificada en formato de pélets.

A continuación, se resumen las principales ventajas en los aspectos técnico, ambiental y económico de los pélets frente a otros combustibles (Atuesta-Boada & Sierra-Vargas, 2015; Bajwa *et al.*, 2018; Abdoli *et al.*, 2018; Tauro *et al.*, 2018; Kocsis & Csanády, 2019; Tumuluru, 2020; Quiñones-Reveles *et al.*, 2021; Ibitoye *et al.*, 2021):

- Reducción de costos logísticos: se tiene una mayor eficiencia en el transporte y almacenamiento. Se requiere menor espacio de almacenaje, además, tienen una

mayor estabilidad en su composición, por lo que se pueden almacenar y disponer de ellos durante todo el año.

- Mayor eficiencia en la alimentación del material, así como en el llenado de envase la dosificación, gracias a su fluidez y que facilita la automatización;
- La tasa de combustión puede ser comparable a la del carbón;
- Es posible quemar en calderas de parrilla;
- Es considerada como una energía limpia y renovable: su uso puede ser considerado como neutro en cuanto a emisiones porque producen CO<sub>2</sub> equivalente al retenido en los tejidos de la planta de la cual se obtiene la biomasa;
- Se logra una combustión más uniforme y una mayor eficiencia energética que puede alcanzar hasta un 95%, esto a diferencia de la combustión de leña, por lo que también las emisiones de material particulado y algunos gases como el CO<sub>2</sub> son menores;
- Su densidad energética es mayor;
- Se reduce el riesgo de combustión espontánea en el almacenamiento ya que no hay volatilidad;
- Se puede regular mejor la generación de calor;
- La caldera de pélets suele tener un menor mantenimiento;
- Es relativamente más barato que cualquier combustible fósil;
- El precio del pélet no depende de los continuos cambios en el precio del petróleo.

La operación de peletizado requiere del previo acondicionamiento de la biomasa a procesar, además de las operaciones propias de recolección, almacenamiento y transporte de la materia prima hasta el sitio donde será procesado.

La amplia variedad de biomasa que puede ser utilizada para peletizar, requieren diferente manipulación, preparación y tecnología de densificado dadas sus propiedades individuales como la distribución de tamaño de partícula, contenido de humedad, entre otros. Las operaciones de pretratamiento dependen del tipo de materia prima en particular, sin embargo, los principales procesos que tienen una aplicación más generalizada son: corte o astillado, secado, post-astillado y acondicionamiento (Kocsis & Csanády, 2019).

#### 5.6.1. Astillado

Una de las formas más adecuadas para la producción directa de pélets es mediante el astillado teniendo en cuenta siempre el contenido de humedad del material. Ahora, un paso principal en el pretratamiento es la reducción de tamaño de la materia prima en piezas de entre 10 y 20 mm. Para el desbaste primario se utilizan astilladoras que tienen distintas características técnicas, dependiendo del tipo específico material para el que están diseñados. Por ejemplo, las astilladoras de tambor están diseñadas principalmente para triturar subproductos agrícolas (Kocsis & Csanády, 2019).

#### 5.6.2. Secado

El secado es una etapa del pretratamiento que es crucial, debido a las distintas implicaciones que tiene tanto en el proceso de peletizado como en el producto final. La práctica más común para el secado de la materia prima es el secado artificial, sin embargo, el consumo energético que implica esta operación puede llegar a ser incluso la mitad o más de la mitad de la energía total que se consume en un proceso de producción de pélets. Es por ello que, lo más recomendable es el secado natural al aire libre (Kocsis & Csanády, 2019).

### 5.6.3. Molienda y tamizado

Dependiendo de la materia prima y el equipo de astillado para una reducción de tamaño primario, no siempre logran producir una distribución de tamaño de partícula adecuado para ser prensado de manera directa. Es por esta razón que por lo general se requiere una molienda como operación posterior al astillado. Los molinos de martillos son equipos que cuentan con un tipo de cuchillas oscilantes (martillos) que giran a altas velocidades y son capaces de reducir el tamaño de un material debido al golpeteo que se genera sobre este, participan también unas pantallas metálicas que rodean a los martillos y con los cuales las partículas colisionan produciendo una desintegración adicional, además, una pantalla de salida (malla) controla el flujo y el tamaño del material que sale del equipo. La energía de la molienda depende de la fragilidad del material, motivo por el cuál es recomendable procesar el material seco (Abdoli *et al.*, 2018; Kocsis & Csanády, 2019).

### 5.6.4. Acondicionamiento

Un contenido de humedad óptimo según varios autores se encuentra en un rango del 10 al 15%, valores por debajo o por encima de este rango pueden generar una calidad de pélets no deseada. Es por ello que es importante controlar el proceso de secado de la biomasa antes del prensado (Stelte *et al.*, 2011; Kocsis & Csanády, 2019).

### 5.6.5. Peletizado: técnicas de aglomeración

Una vez acondicionada la biomasa se dispone a su peletización donde el material se hace pasar por una matriz que tiene agujeros que utilizan alta presión para formar los pélets (Abdoli *et al.*, 2018). Sin embargo, el proceso de densificación a nivel laboratorio y a nivel industrial tienen sus diferencias, por ejemplo, a nivel de laboratorio se tiene un mayor control de los parámetros y de las condiciones del proceso.

Generalmente las técnicas de aglomeración se basan en tres tipos: 1) caída o aglomeración constructiva, 2) aglomeración térmica o de sinterización y la última y la más ampliamente usada para el peletizado 3) aglomeración por presión o compresión (Abdoli *et al.*, 2018). Para el peletizado, se utiliza una prensa (peletizadora) que consta de una matriz de acero que tiene pequeños orificios y cuenta con dos rodillos (generalmente). El equipo cuenta con una tolva de alimentación. Al encender el equipo y alimentar el material a peletizar, los rodillos giran sobre un eje central imprimiendo una presión que empuja el material sobre la matriz de extrusión y generando la salida de un producto en forma cilíndrica.

#### 5.6.5.1. Mecanismos de densificación y unión

Los mecanismos de unión de las partículas que han pasado por un proceso de densificación definen la resistencia, la durabilidad o estabilidad física de los productos (Kaliyan & Morey, 2009) así como su apariencia, pero también, están estrechamente relacionados con otras propiedades como la resistencia al agua y la eficiencia en la transferencia de masa y calor durante la ignición y combustión (Kang *et al.*, 2019).

Son cinco los mecanismos de unión en los que puede darse la aglomeración de un material (Rumpf, 1962; citado por Abdoli *et al.*, 2018):

- 1) *Puentes sólidos*: es un puente o enlace entre partículas que se puede formar por sinterización, reacciones químicas, fusión, endurecimiento de agentes de unión o por la cristalización de materiales disueltos.

2) *Fuerzas interfaciales y capilares en superficies líquidas móviles*: la unión entre partículas se da por la presencia de humedad durante el proceso de densificación y que a su vez se lleva a cabo en tres etapas:

- a) Estado pendular; se presenta al inicio de la densificación como espacios de aire entre las partículas, donde estas últimas se unen por fuerzas de atracción, tensión superficial y fuerzas capilares.
  - b) Estado funicular; en esta etapa, los espacios de aire inicial son reemplazado a medida que la presión sobre las partículas aumenta y estas se juntan más firmemente.
  - c) Estado capilar; aquí, la presión capilar y las fuerzas entre las fases forman enlaces fuertes entre las partículas las cuales desaparecen hasta que se evapora el líquido (Pietsch, 1997).
- 3) *Fuerzas en puentes de unión que no pueden moverse libremente*: estas fuerzas son principalmente adhesivas y cohesivas y son atribuidas a agentes aglutinantes viscosos que se endurecen durante el proceso de aglomeración o bien, pueden ser atribuidas a capas de finas adsorción que suavizan la rugosidad de la superficie y aumentan el área de contacto entre partículas o disminuyen la distancia efectiva entre estas mismas, permitiendo de esta forma la participación de las fuerzas intermoleculares (Ghebre-Sellassie, 1989, citado por Abdoli *et al.*, 2018) .
- 4) *Atracción entre partículas sólidas*: algunas partículas pequeñas pueden atraerse entre sí, ya sea mediante fuerzas intermoleculares como fuerzas de Van der Waals o de valencia, o bien, fuerzas más débiles como las cargas electrostáticas o magnéticas (Ghebre-Sellassie, 1989, citado por Abdoli *et al.*, 2018).
- 5) *Enclavamiento mecánico (enlaces cerrados por forma)*: esto puede darse durante la compresión de partículas fibrosas, voluminosas y de forma plana. Dicho fenómeno podría contribuir en cierta medida en una reducción de la resistencia de los sólidos obtenidos (Manickam *et al.*, 2006), es decir, una reducción en la durabilidad mecánica.

La aplicación de altas presiones y temperaturas es lo que permite la formación de puentes sólidos cuando las moléculas de una partícula se difunden hacia otra partícula en los puntos en los que tienen contacto. Otros fenómenos como reacciones químicas, cristalización, endurecimiento de algunos aglutinantes y la propia solidificación de los componentes fundidos son los que explican la formación de enlaces fuertes entre las partículas. Generalmente, los puentes sólidos se forman después del enfriamiento o el secado de los productos ya densificados (Kang *et al.*, 2019), esto explicaría la apariencia frágil que se observa en algunos pélets inmediatamente después de su extrusión. Cuando hay participación de agentes aglutinantes, estos se suelen endurecer después de su enfriamiento formando enlaces fuertes (Kang *et al.*, 2019).

#### 5.6.5.2. Efectos de la temperatura en el peletizado

Kaliyan & Morey (2009), mencionan que la temperatura aplicada o generada durante el proceso de peletizado se encarga de activar la acción de aglomerantes aplicados en la formación de pélets, así como de promover la deformación plástica de partículas termoplásticas y así, gelatinizar los almidones y desnaturalizar las proteínas, cuando se usan como aglomerantes. Durante el proceso de peletizado, la matriz de extrusión debe alcanzar

La temperatura requerida la cual se encuentra entre los 80 y 90 °C, esto como un requerimiento necesario para obtener pélets de buena calidad, lo cual requiere tiempo, donde el primer material ingresado que no tiene una buena calidad puede ser reingresado (Kocsis & Csanády, 2019). La calidad del pélets durante el peletizado puede apreciarse en algunos casos al observar una correcta formación del material, sin agrietamientos y sin curvaturas, por ejemplo.

#### 5.6.5.3. Influencia del contenido de humedad en el peletizado

Una desviación del rango de valores óptimos de contenido de humedad (10 – 15%) disminuyen las fuerzas de unión entre las partículas provocando con ello una disminución en la estabilidad mecánica de los pélets, donde un contenido de humedad alto implica la presencia de mucha agua en el material, lo cual dificulta su compactación (Kocsis & Csanády, 2019). A nivel laboratorio se ha determinado un valor óptimo de humedad para aserrín de pino (15 %) (González, 2013). Sin embargo, dependiendo de la naturaleza de la biomasa y las características del equipo de peletizado puede variar este valor, esto al tener una presión y temperatura de prensado distinta, además, el tamaño de partícula puede influir de manera importante. Aunque aún no se tiene del todo claro, se sabe que una disminución del contenido de humedad produce el deterioro de fuerzas de unión entre las partículas de la biomasa y con ello la disminución de la durabilidad del producto (Kocsis & Csanády, 2019).

#### 5.6.5.4. Tamaño de partícula

El tamaño y la distribución de las partículas están ampliamente ligados a las propiedades físicas que desempeña la biomasa (Oyedeki *et al.*, 2020). La fluidización, el área superficial, la transferencia de calor y masa son las principales propiedades que se ven afectadas dependiendo del tamaño de partícula de la biomasa (Lamers *et al.*, 2015).

Son varias las técnicas que se utilizan para medir el tamaño de partícula de biomasa lignocelulósica donde se incluyen el análisis de tamices, análisis con imágenes, difracción laser y sedimentación. Sin embargo, las técnicas más aplicadas son el análisis de tamiz y el análisis de imágenes. El análisis de tamiz por su parte es el más empleado por los investigadores por ser relativamente más barato y versátil, adicionalmente, se sabe que, a nivel industrial, el tamizado es característico en la mayoría de los procesos de clasificación y separación (Kocsis & Csanády, 2019).

Con independencia del tipo de biomasa que se trate, Kaliyan & Morey (2009), recomiendan los valores de distribución del tamaño de partícula más apropiados para obtener pélets con mejor calidad (ver Tabla 2).

**Tabla 2**

*Distribución de tamaño de partícula recomendado para obtener pélets de alta calidad. Tomado de (Kaliyan & Morey 2009).*

Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje de material retenido en el tamiz (%)
3.0	Hasta 1%
2.0	Hasta 5%
1.0	Alrededor del 20%
0.5	Alrededor del 30 %
0.25	Alrededor del 24 %
< 0.25	No menor al 20%

#### 5.6.5.5. Aditivos como aglutinantes en pélets

Las materias primas relativamente nuevas como los residuos agrícolas suelen diferir en cuanto a su composición química respecto a otro tipo de materiales como la madera procedente de fuentes forestales y por lo tanto pueden influir de manera indeseable en las propiedades de los pélets. En este sentido, los aditivos aglutinantes pueden tener una participación importante, por ejemplo, en la mejora de la durabilidad mecánica del pélet y la reducción de los costos relacionados con su producción (Ståhl *et al.*, 2012), esto es gracias a que los aglutinantes promueven una unión más fuerte entre partículas proveyéndole también de una mayor dureza (Gilvari *et al.*, 2019). Hay que tener en cuenta que el agua también puede fungir como aglutinante, siendo una forma fácil y económica de producción, sin embargo, cuando no es suficiente, se suelen utilizar otros aglutinantes como biomasa de fuentes distintas, proteína, glicerina, almidón, entre otros (Gilvari *et al.*, 2019).

El almidón es un aditivo ampliamente usado y se ajusta a criterios como, ser renovable y con propiedades que lo convierten en general como un aditivo útil (BeMiller & Whistler, 1996; Ståhl *et al.*, 2012). Sin embargo, es importante la selección del tipo y la dosis de aglutinante a utilizar, ya que la adición puede afectar de manera negativa a las propiedades finales de los pélets (Gilvari *et al.*, 2019). En este sentido, algunos estudios han demostrado que el almidón de maíz o fécula de maíz es particularmente más eficaz como aditivo aglutinante, comparado con otras fuentes como el almidón de tapioca y almidón de papa (Ståhl *et al.*, 2012), sólo por mencionar algunos.

#### 5.7. Caracterización de pélets biocombustibles y su calidad

La caracterización de un biocombustible sólido se puede realizar de forma directa a partir de la determinación de los parámetros más relevantes, en este sentido la determinación de las propiedades específicas de un material para su uso energético se cuenta con tres grupos de características: 1) la composición elemental 2) las propiedades técnicas de combustión y 3) las propiedades mecánicas (los grupos 2 y 3 también suelen reportarse como parámetros físicos) (Hartmann, 2019).

La caracterización de la biomasa como biocombustible, generalmente suele reportarse con base en análisis proximal (humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo, % en peso), análisis último o elemental (C, H, O, N y S; % base seca), análisis químico básico (celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles, % en base seca) y el valor calorífico de la biomasa que comúnmente se reporta como el poder calorífico superior (PCS, dado en MJ/kg). La caracterización de pélets por su parte incluye adicionalmente la determinación de parámetros físicos y mecánicos como tamaño y distribución de partícula (antes del peletizado), longitud y diámetro de pélets, humedad final y densidad de partícula de pélet, densidad a granel y durabilidad mecánica.

Los estándares internacionales de calidad desarrollados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) incluyen una serie de normas en materia de calidad de pélets biocombustibles que se basan en criterios como: requisitos generales de calidad (EN ISO 17225-1:2014), pélets de madera clasificados para uso comercial y uso doméstico (EN ISO 17225-2:2014) y clasificación de pélets no leñosos (Picchio *et al.*, 2020). Aunque distintos

países europeos como Alemania, Austria, Suecia, Italia y Francia ya tenían sus propias normas y regulaciones en materia de pélets biocombustibles, a hacia finales del año 2014 se adoptó en Europa por parte de los organismos nacionales de normalización, la serie EN 17225:2014 como norma nacional (Alakangas, 2011). La norma española EN 17225-1 (2014), indica las principales especificaciones de los biocombustibles sólidos, donde, la fuente y el origen de la biomasa es una de ellas. La biomasa leñosa, es una de las 5 clasificaciones de grupos de biocombustibles sólidos según su origen, y que proviene de biomasa de árboles, matorrales y arbustos. La clasificación correspondiente a la biomasa de poda de aguacate según la EN 17225-1 (2014) y con base a su origen y fuente se desglosa jerárquicamente a continuación:

1. Biomasa leñosa

- 1.1 Biomasa leñosa procedente del monte, plantación y otra madera virgen

- 1.1.7 Madera procedente de jardines, parques, mantenimiento de arceles, viñedos, huertos y madera a la deriva en agua dulce.

Los estándares EN 17225-2 (2014) que es específico para pélets de madera, permiten clasificar un producto en relación con su uso específico, dependiendo sus características particulares, estos podrían tener un uso industrial o no industrial. El no industrial está referido a su uso en equipos pequeños ya sea en hogares o pequeños edificios comerciales o del sector público y que tienen restricciones más flexibles que en el caso de un uso industrial (Alakangas, 2011). A continuación, se presentan algunas especificaciones de las clasificaciones de pélets de madera según su uso final:

- 1) Aplicaciones en edificios residenciales, edificios comerciales pequeños y edificios públicos. Se clasifican tres clases de calidades de pélets para aplicaciones residencial y comercial: A1, A2 y B donde, los primeros dos representan madera virgen y residuos de madera no tratada químicamente, donde, A1 representa niveles más bajos en cenizas y nitrógeno que A2. La tercera clase se denomina clase B, que incluye madera y subproductos de madera químicamente tratada de la industria del procesado madera y la madera usada químicamente no tratada.
- 2) Aplicaciones para la generación energética industrial. También incluye tres clases de calidades de pélets para uso industrial: I1, I2 e I3, los primeros dos representan madera virgen y residuos de madera no tratada químicamente y tienen un contenido de cenizas y nitrógeno similar a A2, mientras que la clase I3 permite subproductos y residuos industriales de madera tratada químicamente y madera usada no tratada químicamente.

Existe también una certificación de pélets de madera que se basa en la norma EN 17225-2 (2014), llamada *ENplus®*, la cual tiene algunos requerimientos de combustibles de más alta calidad que los especificados en la norma para uso residencial o comercial, esto debido a que, entre otras consideraciones, los equipos de pequeña escala no suelen tener controles avanzados de limpieza de los gases de combustión. En este estudio se evalúan los pélets obtenidos con base en la certificación ENplus (2015) (uso residencial y comercial) y en la norma EN 17225-2 para uso industrial.

En cuanto a las forma de aprovechamiento, el peletizado de la biomasa trae consigo algunas ventajas como el aumento de su densidad energética, pero también en cuanto a la eficiencia en la combustión (Masera-Cerutti *et al.*, 2011; Meincken & Tyhoda, 2014; Kocsis & Csanády, 2019), esto último debido a que los gránulos tienen mayor facilidad de quemarse gracias a su gran área superficial y a una mejor transferencia de calor (Bajwa *et al.*, 2018), además, el tamaño geométrico fijo y la estandarización del producto le confieren la característica de homogeneidad que garantiza un menor costo de transporte y almacenamiento, pero también, una alta eficiencia energética de hasta el 95% (Kocsis & Csanády, 2019), la regulación del calor según la alimentación suministrada al sistema o la tecnología de aprovechamiento energético utilizado pudiendo inclusive ser programado, ya que otra de las ventajas es que la alimentación de los pélets se puede automatizar, además, los pélets de madera producen bajas emisiones de CO<sub>2</sub> y, dado que producen también poca materia residual tras su combustión, los costos de mantenimiento se ven reducidos (Kocsis & Csanády, 2019). La densificación de la biomasa también ha demostrado tener ventajas frente al uso de la biomasa sin densificar en procesos de gasificación, esto al aumentar la eficiencia del proceso (Pradhan *et al.*, 2018).

En cuanto al uso de fécula de maíz como aditivo aglutinante, se ha encontrado en varios estudios que este contribuye al mejoramiento de calidad de pélets al modificar los valores de parámetros físicos y mecánicos (Ibitoye *et al.*, 2021) como el aumento en la durabilidad mecánica que es un parámetro de calidad importante a la hora del manejo y transporte de los pélets desde el sitio donde son producidos hasta el lugar donde serán aprovechados (Ståhl, 2012). Otro efecto favorable es la reducción del contenido de humedad final del pélet, además, la densidad de la partícula puede verse reducida y contribuir de esta forma al proceso de peletizado al disminuir la frecuencia de bloqueos en los troqueles o la matriz de extrusión (Tarasov *et al.*, 2013; García-Maraver & Carpio 2015; Gilvari *et al.*, 2019).

#### 5.8. Uso de pélets en el contexto global y local

En años recientes, el uso de pélets alrededor del mundo se ha popularizado, estos pueden ser utilizados en estufas o pequeñas calderas de viviendas, gasificadores y en distintos equipos de aplicación industrial, en países europeos, por ejemplo, ya se ha vuelto común el uso de pélets de madera en estufas o calderas residenciales (Pradhan *et al.*, 2018). En la Unión Europea (UE), el aumento en el uso de pélets en calderas domésticas para la calefacción residencial es atribuido al bajo costo de los pélets y a la percepción que se tiene sobre los ellos como “energía verde” (Marcotte *et al.*, 2020), en el aspecto técnico se ha reportado una mayor eficiencia frente a estufas de leña tradicionales (Alves *et al.*, 2019).

En México se ha estimado el potencial energético para el mercado de pélets de residuos agrícolas y forestales entre 131 y 233 PJ/año (Tauro *et al.*, 2018), donde, no ha sido contemplada la disponibilidad de residuos de poda de frutales por lo que el potencial puede ser aún mayor. Dada la disponibilidad de recursos biomásicos en el país, se han propuesto varios usos potenciales para los pélets, figurando principalmente los usos para la calefacción en los sectores residencial y comercial (Tauro *et al.*, 2018) o para la producción de energía eléctrica (Martínez-Guido *et al.*, 2019). También han sido planteados escenarios para el uso de pélets de madera en pequeñas y medianas empresas donde se han identificado algunos nichos de oportunidad para el uso potencial de pélets, estos nichos son: empresas caleras

(calcinan piedra caliza para obtener óxido de calcio), cerveceras artesanales, así como pequeñas empresas de productos lácteos (Ruíz-Carmona *et al.*, 2021).

Gracias a las ventajas que presenta este tipo de tecnología de densificado, en la última actualización publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2020) sobre la “Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios en México”, se considera a los pélets como una de las alternativas de tecnologías eficientes para el aprovechamiento de la bioenergía. En este contexto, Martínez-Guido *et al.* (2019) evaluaron los potenciales beneficios del uso de pélets en plantas de eléctricas en México con una planificación que considera la integración de residuos agrícolas en forma de pélets a la red eléctrica nacional, teniendo en cuenta entre otros aspectos, los costos y las emisiones generadas considerando dentro de la cadena de suministro, todas las actividades implicadas, partiendo de la recolección de residuos hasta el aprovechamiento de los pélets en las centrales eléctricas. Aún sin contemplar los residuos de poda de frutales, estimaron que se podría satisfacer casi el 64.9 % de la demanda nacional de energía eléctrica, con lo que se podría asegurar una reducción importante de la dependencia energética de combustibles fósiles (Martínez-Guido *et al.*, 2019).

Dentro de las alternativas de aprovechamiento energético de los pélets, está la combustión directa para la generación de calor y electricidad o bien, para la obtención de gases u otros productos de valor (biogás, bioaceites o biocarbón). Para ello, es necesario tener en cuenta que el uso de los pélets en algunos sectores como el industrial, incluyendo las pequeñas y medianas industrias, supone en muchos de los casos la necesidad de sustituir o adaptar tecnologías de uso final lo cual implica costos que deben ser tomados en cuenta para poder valorar su utilización (Tauro *et al.*, 2018; Ruíz-Carmona *et al.*, 2021). En cuanto al sector industrial para la valoración de los potenciales usos de pélets, algunos de los desafíos más importantes parten de la calidad de la biomasa y el tipo de tecnología utilizada para su aprovechamiento, hasta el diseño de procesos integrados (Pradhan *et al.*, 2018).

#### 5.9. Generalidades sobre *Persea americana* Mill.

El aguacate (*Persea americana* Mill.), según su clasificación botánica, es un miembro de la antigua y numerosa familia de las Lauráceas, siendo el único representante de importancia económica entre las frutas comestibles de esta familia y que es originario de México y Centroamérica (Sánchez-Pérez, 1999; Pérez *et al.*, 2015).

En México, según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para el mes de enero del 2021, la superficie plantada con árboles de aguacate fue de 248,248 hectáreas. La entidad federativa que cuenta con mayor superficie plantada es Michoacán con un 70.5 % de la superficie total, seguido por el estado de Jalisco con un 11.2% (SIAP, 2021b).

##### 5.9.1. Manejo de poda

La poda del cultivo del aguacate tiene como finalidad el favorecer altos rendimientos del fruto y reducir el riesgo de plagas y enfermedades principalmente (INTAGRI, 2017a). El manejo de podas de aguacate, así como los nombres que se le asignan es muy variable, pero según Soria-González (2019) en un estudio realizado en el municipio de Salvador Escalante, Michoacán, estos pueden ser agrupados en tres tipos principales de poda dependiendo de la intensidad, es decir, la cantidad de biomasa generada en esta operación, siendo de mayor a menor intensidad los siguientes: 1) poda de rejuvenecimiento, 2) poda de mantenimiento intensivo y 3) poda de mantenimiento ligero. De la biomasa generada de las podas, la que

tiene un mayor potencial de ser aprovechada es la biomasa de ramas, dado el tipo de manejo, pues, las hojas y las ramas de pequeños diámetros suelen triturarse y esparcirse dentro del mismo huerto, mientras que en algunos casos sólo son quemadas. Por su parte, las ramas de un mayor diámetro suelen utilizarse como leña, o simplemente dejarse a la intemperie para su degradación natural (Soria-González, 2019).

Dado que la región aguacatera de Michoacán, produce grandes cantidades de biomasa procedentes de labores de poda, se han propuesto alternativas para su gestión o aprovechamiento, como en el estudio realizado por Medina & Medina (2018), quienes diseñaron y construyeron un prototipo de reactor pirolítico móvil para la obtención de biocarbón a partir de poda de aguacate, no obstante, los costos implicados en la producción de este tipo de tecnología son elevados.

García-Vargas *et al.* (2020) han sugerido que, dados los volúmenes altos de biomasa generados tras la realización de las podas que implican mucho trabajo y costes elevados, una de las alternativas sostenibles para el aprovechamiento directo en campo de estos residuos es el compostaje, sin embargo, esta alternativa puede implicar costos adicionales ya que de acuerdo a lo informado en la literatura, se puede requerir una cantidad adicional de nitrógeno para cubrir los requerimientos de descomposición del sustrato (Hartmann *et al.*, 1990). No existe un uso propiamente dicho en la región, su uso está limitado normalmente como fuentes de leña, material para el cercado de huertos, como “puntales” para levantar ramas bajas de árboles, o la utilización de algunos troncos en la fabricación de cajas para el transporte de fruta (Soria-González, 2019).

## 6. Antecedentes de la investigación

La determinación de la calidad de pélets biocombustibles, está definida principalmente por sus propiedades físicas, químicas y energéticas, por lo cual mucha de la literatura se enfoca en la caracterización de la biomasa previo a definir su potencial uso. Por ejemplo, Fernández-Puratich *et al.* (2014) evaluaron la calidad de residuos de cuatro especies de árboles mediterráneos, siendo tres de estas especies de árboles frutales (naranja, olivo y almendro) y cuyo resultado arrojó que las propiedades de dichas especies cumplen en lo general, con la normativa para la producción de pélets a partir de ellas. Algunos estudios se limitan a la caracterización de los residuos para evaluar su potencial como biocombustibles sólidos (García *et al.*, 2014; García-Maraver, 2015; Brand *et al.*, 2018; Picchi *et al.*, 2018; Mondragón-Valero *et al.*, 2018; Brand & Jacinto, 2020; Rutiaga-Quiñones, *et al.*, 2020; Bianchini *et al.*, 2021; Carrillo-Parra *et al.*, 2021), en este mismo sentido Soria-González (2019), compiló los resultados de una serie de estudios acerca del aprovechamiento de poda de frutales con fines energéticos. Por otro lado, se ha reportado la optimización de los parámetros de producción de pélets a partir de poda de árbol de pistacho, evaluando el efecto de la humedad, la temperatura de peletizado y el tamaño de partícula en la calidad de los pélets (Ramezanzade & Moghaddan, 2018). También se ha reportado la caracterización de poda de guayaba para su aprovechamiento como briquetas (Ivanova *et al.*, 2018).

En cuanto a la biomasa de aguacate, se ha caracterizado cáscara, semilla del fruto, ramas, hojas y corteza de aguacate (Sánchez-Pérez, 1999; Bernabé, 2011; García *et al.*, 2012; Solano y Mendoza, 2014; Domínguez *et al.*, 2014; Martínez-Pérez *et al.*, 2015; Pérez-Arévalo *et al.*, 2015; Perea-Moreno *et al.*, 2016; Soria-González, 2019; García-Vargas *et al.*, 2020). Además, se han caracterizado residuos de poda donde se analiza la influencia de variedad del aguacate, así como el tipo de fertilización del cultivo respecto a algunas de las propiedades de la biomasa como biocombustible sólido (Paniagua *et al.*, 2021).

Por otro lado, algunos estudios reportados en la literatura ya han evidenciado la utilización de aditivos en pélets, tanto para residuos forestales como distintas fuentes agrícolas, donde, se ha probado que los pélets con la adición de fécula de maíz, a determinadas proporciones en mezcla, adquieren mejores características de calidad (Ståhl *et al.*, 2012). Recientemente se ha reportado el efecto positivo de la fécula de maíz en la integridad de pélets producidos a partir de biocarbón de residuos agrícolas, donde, según indican los autores, la adición de un 1% de fécula produjo pélets más rígidos y estables que los obtenidos sin aditivo (Selvarajoo *et al.* 2021).

En los últimos años se han publicado una gran cantidad de estudios respecto a la calidad de pélets biocombustibles, sin embargo, en la literatura son menos las publicaciones relacionadas con residuos de poda de frutales. Se ha evaluado la calidad de pélets de la poda de naranja a (Gürdil *et al.*, 2019), poda de olivo y granada (Kocer & Kurklu, 2020), pélets obtenidos a partir de la mezcla de poda de manzana y madera de pino a distintas proporciones (Brand & Jacinto, 2020), pélets de poda de árbol de avellana y de olivo (Acampora *et al.*, 2021), pélets de poda de olivo y de cáscara de girasol (Kougioumtzis *et al.*, 2021). Más recientemente, se ha reportado la caracterización de pélets obtenidos a partir de poda de árbol de guayaba (Ruíz-García *et al.*, 2022).

## 7. Metodología

### 7.1. Sitio de estudio

El sitio de estudio seleccionado para la caracterización de residuos de poda de aguacate fue el municipio de Salvador Escalante, Michoacán, México. La elevación sobre el nivel del mar de los huertos muestreados se sitúa entre los 1880 y 2230 msnm.

En el mapa de la Figura 2, se muestra gráficamente la región seleccionada; resaltado en color azul se indican los límites estatales y municipales y en color amarillo la extensión territorial estado de Michoacán y del municipio de Salvador Escalante. Se muestra también un acercamiento donde se observan algunos de los municipios colindantes de la región.

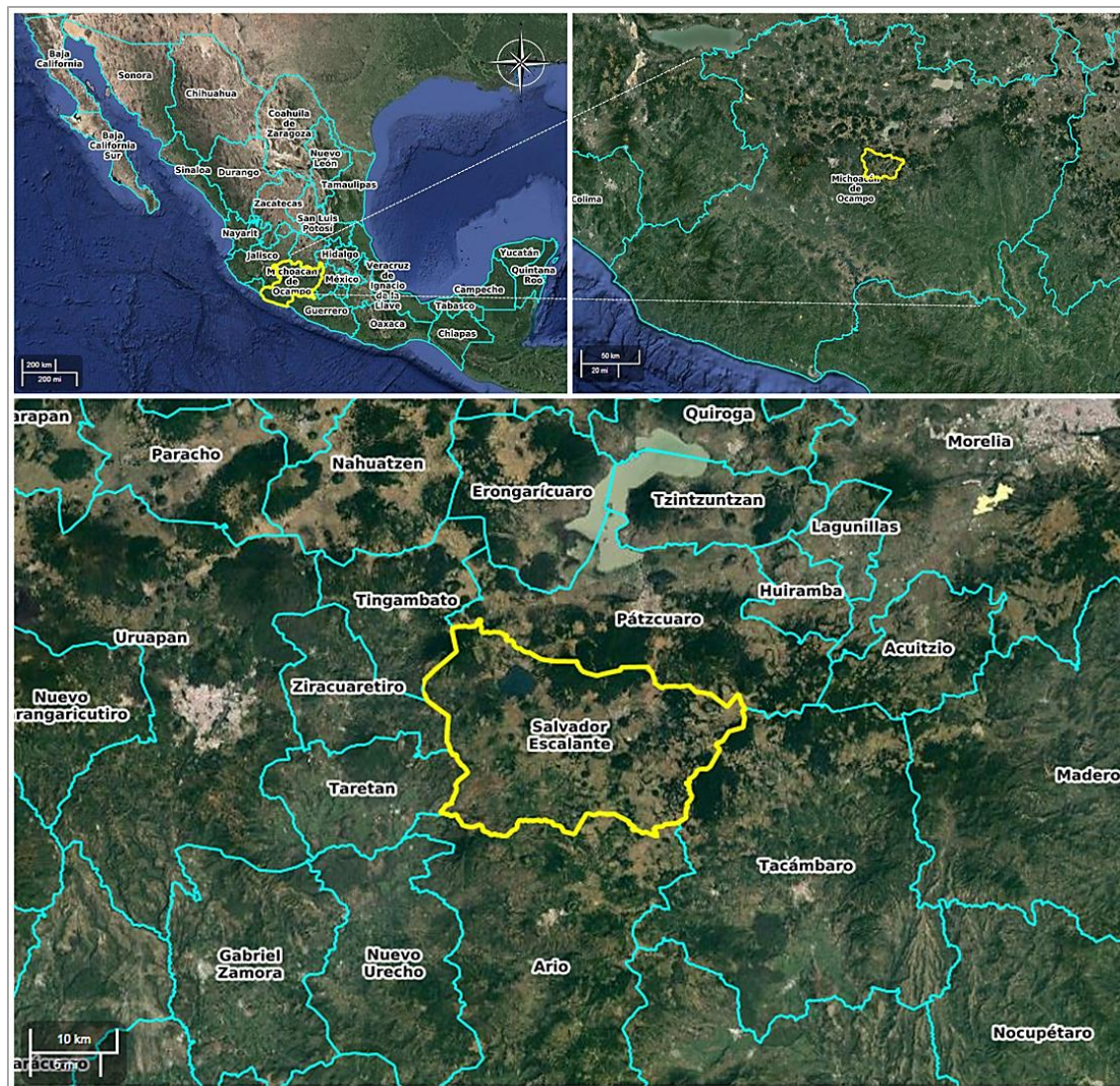


Figura 2. Mapa del sitio de estudio. Municipio de Salvador Escalante, Michoacán, México. Fuente: INEGI (2022).

## 7.2. Muestreo

El muestreo se dividió en dos etapas que consistieron en:

- 1) Colecta para caracterización de biomasa:
  - a) Clase R: ramas de diámetros superiores a 2.5 cm. De aquí se obtuvieron 2 subclases denominadas: ramas sin corteza (R-SC) y corteza (C).
  - b) Clase RPH: ramas pequeñas y hojas. Ramas de diámetros inferiores a 2.5 cm.
- 2) Colecta de biomasa para peletizado: colecta de ramas clase R.

Se muestrearon 10 huertos de distintas localidades ubicadas del municipio de Salvador Escalante. Se obtuvo un número total de 30 muestras correspondientes a árboles distintos. El muestreo se realizó entre los meses de octubre y diciembre de 2020. Todos los huertos muestreados tienen un manejo de tipo tradicional (utilizan agroquímicos en su manejo). La variedad de aguacate en la mayoría de los huertos fue variedad Hass. Según Hernández (2015), la superficie plantada de aguacate en México de la variedad Hass, es la predominante frente a otras variedades, teniendo como referencia la superficie sembrada con dicha variedad para el año 2013, en un porcentaje representativo del 96.25 % y un 3.75 % de otras variedades.

Cabe recordar que, la clase R es la biomasa de principal interés en este estudio, por lo que fue la única fracción seleccionada para el peletizado.

## 7.3. Caracterización de biomasa

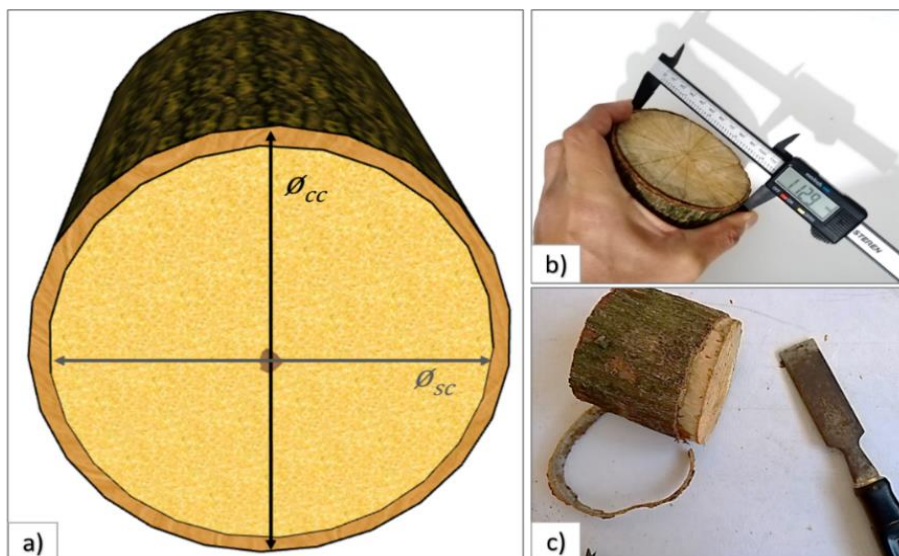
La colecta del material para su caracterización se realizó de manera aleatoria tomando muestras representativas de la poda resultante de árboles recién podados. La selección de cada muestra se hizo tomando fracciones de ramas de diámetros superiores a los 2.5 cm para el caso de biomasa leñosa (R) y RPH. Las muestras colectadas, se introdujeron en bolsas herméticas para su transporte y su posterior preparación.

### 7.3.1. Determinación del porcentaje de corteza en ramas

Se realizó el cálculo del porcentaje de corteza en cuatro fracciones de ramas con diámetros de 2.5, 5, 7.5 y 10 cm aproximadamente. Las muestras fueron secadas al aire libre por un tiempo mínimo de 48 horas. El porcentaje de corteza de ramas se determinó siguiendo la metodología descrita por Velázquez-Martí *et al.* (2017) donde, para cada una de las fracciones, se midieron los diámetros de 30 ramas con y sin corteza utilizando un vernier digital con precisión 0.01 mm. Se midieron los diámetros de cada rama en 8 puntos distintos para posteriormente obtener un valor promedio del diámetro con corteza ( $\emptyset_{cc}$ ) y el diámetro sin corteza ( $\emptyset_{sc}$ ) (ver Figura 3).

El porcentaje de corteza se obtuvo a partir de la siguiente ecuación (Velázquez-Martí *et al.*, 2017):

$$\text{Corteza (\%)} = \frac{\emptyset_{cc}^2 - \emptyset_{sc}^2}{\emptyset_{cc}^2} * 100$$



**Figura 3.** Determinación del porcentaje de corteza. a) diámetro con corteza  $\varnothing_{cc}$  y diámetro sin corteza  $\varnothing_{sc}$ , b) medición de diámetro con corteza con vernier y c) descortezado para medición sin corteza.

### 7.3.2. Preparación de muestras

El propósito de la preparación de las muestras es obtener porciones de ensayo reducidas pero que cuenten con las mismas características de la muestra original. En el estudio, el total de muestras colectadas se integraron en una muestra mixta o muestra compuesta siguiendo los métodos de presecado, reducción de tamaño de partícula, división de muestra, tamizado, almacenamiento y etiquetado de la muestra, entre otras recomendaciones que son descritas en la norma EN 14780 (2018), de la normalización española. En las Figura 4 y 5 la etapa de preparación de muestras de las clases R y RPH, respectivamente.



**Figura 4.** Preparación de muestras: clase R. Reducción de tamaño de ramas de diámetros superiores a 2.5 cm. Reducción de tamaño a astillas hasta la obtención de una harina tamizada en malla 40 (425  $\mu\text{m}$ ).

Las ramas se separaron en dos fracciones, de las cuales una fue denominada clase R y a partir de la segunda fracción se obtuvieron las subclases R-SC y C tras separar la madera de la

corteza. Las fracciones leñosas se redujeron a trozos más pequeños para favorecer la eliminación de humedad y para facilitar el proceso de molienda en una etapa posterior (ver Figura 4). Para obtener la harina de las tres clases de biomasa se utilizó un molino (Mezcladora Micrón, modelo K20F, serie 236, Micrón S.A. de C.V., Ciudad de México, México) de 7.5 hp de potencia. Posteriormente fueron tamizadas cada una de las muestras según el tamaño requerido para las determinaciones a realizar.



**Figura 5.** Preparación de muestras: clase RPH. Ramas de diámetros inferiores a 2.5 cm y hojas. Procesamiento de deshojado y troce de ramas hasta la etapa de molienda.

### 7.3.3. Relación entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas

Para poder determinar la relación entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas en madera de aguacate, se analizaron 5 mezclas de madera y corteza (subclases R-SC y C descritas previamente; sección 7.2. Muestreo), a distintas proporciones (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100 %, respectivamente). La determinación de cenizas se realizó con base en los criterios de la norma EN 18122 (2016) por triplicado. A partir de los datos obtenidos se generó la curva de regresión lineal para observar su nivel de correlación.

### 7.3.4. Determinación de contenido de humedad total

Se colectaron 3 muestras de ramas de la clase R y 3 de la clase RPH, las cuales se tomaron recién podadas (10-15 minutos después de su corte), inmediatamente después se pesaron y

se guardaron en bolsas de plástico herméticas para su traslado al laboratorio, donde posteriormente fueron reducidas de tamaño, evitando la pérdida de material en el proceso. El contenido de humedad total de las muestras se realizó por triplicado con base en la norma EN 18134-2 (2017) que establece el método de ensayo de secado en estufa. El ensayo se realizó en una estufa de flujo forzado (Drying and heating oven, Binder GmbH, modelo BD 260, Tuttlingen, Germany) (Figura 6).



**Figura 6.** Determinación del contenido de humedad total de R y RPH, por el método de secado en estufa según la EN 18134-2 (2017).

### 7.3.5. Análisis proximal

El análisis proximal se realizó por triplicado con base en los métodos estandarizados siguientes: contenido de cenizas EN 18122 (2016), contenido de materia volátil EN 18123 (2016) y carbono fijo (determinado por diferencia) (ver Figura 7). Se analizaron las clases R, R-SC, C y RPH.



**Figura 7.** Análisis proximal. a) determinación de porcentaje de cenizas: pesada de muestra, calcinación, introducción a mufla (a  $550 \pm 5$  °C por 90 min), enfriamiento en desecador y pesada del residuo. b) determinación de materia volátil: pesada de muestra, introducción a mufla (a  $900 \pm 10$  °C por 7 min), enfriamiento en desecador, pesada del residuo y residuo obtenido.

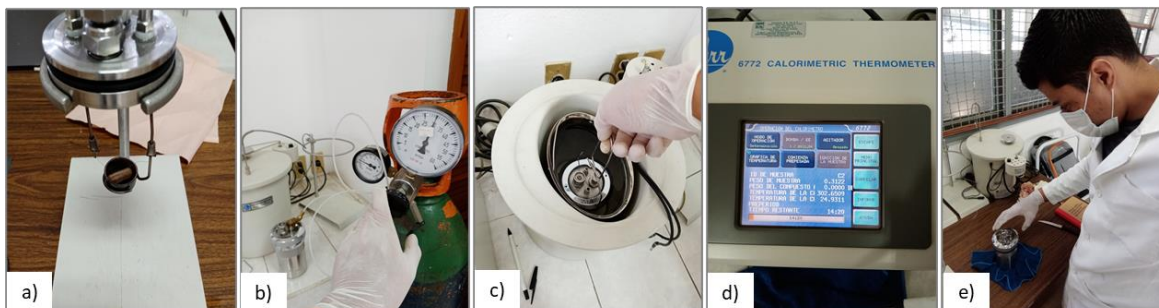
El contenido de humedad se obtuvo utilizando una termobalanza (Adam Equipment, modelo PMB53, Adam Equipment Inc., Oxford, Connecticut, USA) con el que se realizó un ensayo con 1 g de muestra tamizada en malla 40 (425  $\mu\text{m}$ ) y dos réplicas (ver Figura 8).



**Figura 8.** Termobalanza empleada para determinación de humedad.

#### 7.3.6. Determinación del poder calorífico

El poder calorífico se determinó para la clase R y para identificar la posible influencia del contenido de corteza, se analizaron las ramas sin corteza (clase R-SC) y la corteza (clase C). Para cada biomasa se realizaron un ensayo con dos réplicas a partir del método de la bomba calorimétrica (Calorimetric Thermometer Parr, modelo 67272, Parr Instrument Company, Moline, Illinois, USA) según la norma EN 18125 (2018) (Figura 9).



**Figura 9.** Resumen de la determinación del poder calorífico superior (PCS). a) preparación de muestra, b) purga y presurización con oxígeno (30 atmosferas), c) introducción de la bomba en cubeta con agua destilada, d) programación del ensayo y e) limpieza de la bomba.

#### 7.3.7. Análisis elemental

Para el análisis elemental se utilizaron 2 g de muestra, donde se analizó 1 g de muestra clase R y 1 g de muestra clase RPH, ambas tamizadas en malla 40 (425  $\mu\text{m}$ ). Se realizó un solo análisis para cada clase, mediante un equipo de análisis elemental (Thermo Fisher Scientific,

modelo Flash 2000 series, Fischer Scientific Inc., Wellesley, Waltham, Massachusetts, USA) y se determinó el porcentaje de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) mediante el método modificado Dumas (Rotz & Giazzi, 2012). El contenido de oxígeno (O) fue calculado por diferencia y haciendo la corrección por cenizas.

#### 7.3.8. Microanálisis de cenizas

Se realizó un análisis de cenizas obtenidas como producto de la calcinación de biomasa de las clases R y RPH (a 550 °C por 1 h). Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) (Varian Agilent, modelo 730-ES, Varian Inc., Mulgrave, Australia) con base en la metodología propuesta por Arcibar-Orozco *et al.* (2014). A partir de esta metodología se rastreó la presencia de 29 elementos químicos.

#### 7.3.9. Análisis químico básico

El análisis químico básico comprende la determinación del porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina. Para este estudio se utilizaron dos muestras de la clase R y dos de la clase RPH. Las muestras se analizaron mediante un equipo para análisis de fibras (ANKOM Fiber Analyzer, modelo AMKON<sup>200</sup>, ANKOM Technology, Macedon, New York, USA) utilizando  $\alpha$ -amilasa con base en el método descrito por Van Soest *et al.* (1991). El contenido de extraíbles se determinó por diferencia y la corrección por cenizas (restando el valor correspondiente).

#### 7.3.10. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico se realizó únicamente para la biomasa de la clase R, con la finalidad de analizar el comportamiento térmico de la madera con y sin corteza separándose en dos fracciones denominadas como “ramas con corteza” y “ramas sin corteza”.

Las muestras fueron colocadas en contenedores en un lugar seco a temperatura ambiente (25 °C) durante 2 días para eliminar la humedad superficial con la que llegan las muestras. Después, se realizó la molienda de grano fino. Una vez secas, se hizo un tamiz (malla 40) a tamaño de partícula uniforme de alrededor de 0.4 mm. La biomasa se llevó a un horno para secarla a 115 °C, monitoreándola hasta obtener un peso constante. Se obtuvo una cantidad aproximada de 30 mg  $\pm$  5 mg de muestra y fue colocada uniformemente en un crisol de alúmina para cada ensayo. Se utilizó un analizador termogravimétrico (Simultaneous Thermal Analyzer, modelo STA 6000, Perkin Elmer Inc., Wellesley, Waltham, Massachusetts, USA). Las condiciones pirolíticas se mantuvieron usando gas nitrógeno grado reactivo (99.99 % de pureza), con un flujo de 30 ml/min. Se hizo un programa de calentamiento lineal de 25 a 850 °C a razón de 10 °C/min, para después mantener en isoterma a 850 °C por 10 minutos y un enfriamiento de 850 a 25 °C a razón de 30 °C/min. Para minimizar el error y lograr altos niveles de precisión y exactitud, cada prueba se realizó por triplicado. Las rampas de calentamiento se realizaron también por triplicado sólo cuando la diferencia de conversión fue superior al 5 % o los datos resultaron con mucho ruido de fondo.

#### 7.4. Proceso de peletizado

Se colectó de manera aleatoria muestras de biomasa leñosa de diámetros superiores a los 2.5 cm de distintos árboles podados en una cantidad aproximada de 50 kg por huerto. Las muestras colectadas fueron trasladadas hasta las instalaciones del Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. (GIRA).

El material colectado se dejó secar al aire libre por aproximadamente un mes para la eliminación de contenido de humedad, necesario para su posterior procesamiento (Figura 10).



**Figura 10.** Biomasa leñosa colectada procedente de poda de aguacate. Secado al aire libre.

#### 7.4.1. Reducción de tamaño

Las ramas de diámetros superiores a 5 cm aproximadamente, se redujeron de tamaño a astillas para poder ser procesadas mediante un molino. Primero, las ramas con diámetros de entre 2.5 y 5 cm se trocearon para facilitar la molienda para después junto con las astillas, ser procesadas en un molino de martillos (ver Figura 11), para obtener un material en forma de aserrín.



**Figura 11.** Reducción de tamaño de ramas. A la izquierda de la imagen: troceado de ramas con ayuda de una caladora. A la derecha: molino de matillos utilizado en la reducción de tamaño de la biomasa leñosa y parte del procesamiento.

#### 7.4.2. Secado de aserrín

El aserrín resultante de la molienda se distribuyó en un área de 12 m<sup>2</sup> aproximadamente con ayuda de un rastrillo jardinero para facilitar la eliminación de humedad por secado al aire libre. El tiempo transcurrido desde la reducción de tamaño hasta el pelletizado fue de 27 días. Durante el tiempo de secado, se removió el material para facilitar el secado (Figura 12).



**Figura 12.** Secado de aserrín.

#### 7.4.3. Distribución del tamaño de partícula

Previo al peletizado se determinó la distribución de tamaño de partícula del aserrín producido tras la molienda se determinó según la norma EN 17827-2 (2016) utilizando un agitador de tamices (RO-TAP®, modelo RX-29, W.S. Tyler, Mentor, OH, USA). Se ensayaron 5 muestras con  $50 \pm 5$  g de biomasa molida, fracciones tomadas de la biomasa a peletizar (ver Figura 13).



**Figura 13.** Distribución de tamaño de partícula por el método de tamizado según la norma EN 17827-2 (2016). En la imagen de la izquierda se observa una muestra de la biomasa utilizada para el peletizado. Al centro se muestra el equipo de tamizado empleado en los ensayos. En la imagen de la derecha se muestra la distribución por tamaños de partícula de las muestras iniciales ya tamizadas.

#### 7.4.4. Obtención de pélets

La etapa experimental que comprende la elaboración de pélets se realizó en las instalaciones del GIRA.

Algunos de los ensayos de caracterización de biomasa y de los pélets elaborados, fueron realizados en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en el Laboratorio de Química y Tecnología Química de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, en tanto que, la determinación de algunos parámetros de calidad de pélets se realizaron en GIRA.

Previo al peletizado se realizaron mediciones del contenido de humedad utilizando un medidor de humedad para granos y cereales de la marca Benetech modelo Gm640. En el caso de requerirlo, se agregó agua con un aspersor (fumigador) para obtener el contenido de humedad deseado. Se tomaron muestras de aserrín siguiendo los métodos de ensayo de la norma EN 14780 (2018), para la toma de muestra por método de cuarteo. El contenido de humedad fue corroborado con la toma de muestra analizada en una termobalanza Adam Equipment.

Antes de la preparación de la mezcla aserrín-fécula se describen algunas características generales del aditivo empleado en este estudio.

#### 7.4.4.1. Características generales de la fécula de maíz empleada

La fécula de maíz utilizada en este estudio fue de la marca Cremena<sup>MR</sup> en su presentación “natural” (sin edulcorantes, saborizantes o colorantes artificiales).

Para el ajuste de humedad en el cálculo de la mezcla aditiva, se determinó el contenido de humedad de la fécula con 3 ensayos de 1 g de muestra por vez, utilizando un analizador de humedad (Adam Equipment, modelo PMB53, Adam Equipment Inc., Oxford, Connecticut, USA). El contenido de humedad obtenido fue de 10.65 %.

Se determinó el contenido de cenizas de la fécula de maíz como se describe a continuación: 1) Se pesó una muestra de 1g de fécula y dos replicas en un crisoles de níquel previamente puestos a peso constante, 2) se calcinó el material en una parrilla eléctrica hasta dejar de observarse humos, 3) se introdujeron las muestras a una mufla (Thermo Fisher Scientific, modelo FB1315M, Fischer Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA) la cual fue precalentada a  $550 \pm$  y se mantuvo por 120 min y 4) se sacaron las muestras de la mufla y se atemperaron en un desecador para finalmente pesar los crisoles con el residuo obtenido. El cálculo de contenido de cenizas se efectuó por diferencia de peso y se realizó el ajuste por humedad.

Según Parker & Ring (2001), para que se logre la gelatinización de la fécula de maíz, se requiere de una cantidad de agua superior al 30 % de su peso y el calentamiento a una temperatura entre 60 y 75 °C para provocar el hinchamiento de las moléculas de almidón por una absorción progresiva e irreversible del agua que se liga a la estructura. Teniendo a consideración estas propiedades de la fécula se llevó a cabo la preparación de la mezcla aditiva como se describe a continuación.

#### 7.4.4.2. Preparación de mezcla

Se calculó la cantidad de fécula al 1.8 % (% en peso) correspondiente para una cantidad de 7 kg de aserrín. El cálculo se efectuó considerando el contenido de humedad de los materiales. Se preparó la mezcla de aserrín - fécula al porcentaje mencionado, para lo cual se disolvió la fécula en 5 L de agua calentada a temperatura de  $75 \pm 5$  °C durante 5 minutos. Se mezcló la solución de fécula con el aserrín por alrededor de 7 min procurando que la

homogeneización fuera lo mejor posible (ver Figura 14). Finalmente, la mezcla se dejó secar al aire libre por 5 días para eliminar el exceso de humedad antes de poderse peletizar.



**Figura 14.** Mezclado de aserrín y solución de fécula de maíz sobre una manta plástica.

#### 7.4.5. Peletizado

La peletización se realizó con un equipo Meelko co-United States, tipo ZLSP200C (Meelko, Florida, USA) con una potencia de 7.5 kW y una capacidad de procesamiento de 80 – 120 kg/h (Figura 15).



**Figura 15.** Proceso de peletizado. A la izquierda se muestra el equipo de peletizado empleado en el proceso. A la derecha, se muestra la pesada del aserrín con una pesola o dinamómetro, el proceso de peletizado del aserrín alimentado y una muestra de los pélets obtenidos, respectivamente.

Previo al peletizado se pesó la cantidad de aserrín en la alimentación para posteriormente volver a pesar al final del proceso ya en formato de pélets (ver Figura 15).

#### 7.4.6. Cálculo del consumo de energía

El consumo de energía durante el proceso de molienda se basó en las especificaciones técnicas del equipo (ver Anexo 1) y el tiempo estimado del uso del equipo, esto para la obtención del consumo específico teórico. Muestras que se empleó, además, el consumo

registrado en el medidor de consumo eléctrico de la red CFE, antes y después del uso del equipo.

El consumo de energía generado con el equipo de peletizado se estimó con base en las especificaciones técnicas del equipo (ver Anexo 1) en cuanto a su potencia y el tiempo de uso del equipo.

#### 7.4.7. Balance de materia en el proceso de peletizado

El balance de materia se realizó utilizando como referencia la alimentación de dos barricas con aserrín, las cuales fueron pesadas previo a la peletización. El contenido de humedad del aserrín también fue medido antes de la alimentación. Cabe señalar que en esta prueba el contenido de humedad fue diferente al registrado en la obtención final de los pélets, el cual fue de 15 %. La cantidad de pélets obtenidos al final del proceso se cuantificó, así como la cantidad de aserrín fino que no logró compactarse y que aparentemente, resultó con un tamaño de partícula inferior a la inicial. A partir de la determinación del contenido de humedad final se evidenció una pérdida de humedad durante el peletizado, lo cual se le puede atribuir a la propia compactación del aserrín, pero también debido a la temperatura de la matriz de extrusión. Para el balance de materia se hizo la siguiente suposición: la pérdida de humedad en los pélets y en el aserrín fino resultante fue en el mismo porcentaje.

#### 7.5. Caracterización de pélets

La caracterización de los pélets se realizó para los pélets con fécula, abreviado como P-CF y para los pélets sin fécula, abreviado como P-SF.

##### 7.5.1. Análisis de dimensiones de pélets

El análisis de dimensiones comprende la longitud y el diámetro de los pélets obtenidos. Las mediciones se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma EN 17829 (2016), donde, con ayuda de un vernier digital se midió la longitud de una muestra de pélets (500 g, en este caso) previamente tamizada en tamiz malla 3.15 mm para la eliminación de finos (< 3.15 mm), de la muestra de ensayo se separaron y pesaron 6 rangos de longitudes (3.15 – 6 mm, 6 – 8 mm, 8 – 10 mm, 10 – 12 mm, 12 – 25 mm y > 25 mm) y del total de pélets medidos se obtuvo la longitud promedio y su desviación estándar. Siguiendo los procedimientos recomendados en la norma EN 17829 (2016) se midió el diámetro de una muestra de 10 pélets de forma aleatoria para finalmente calcular la media y su desviación estándar (Figura 16).



**Figura 16.** Determinación de longitud y diámetro de pélets.

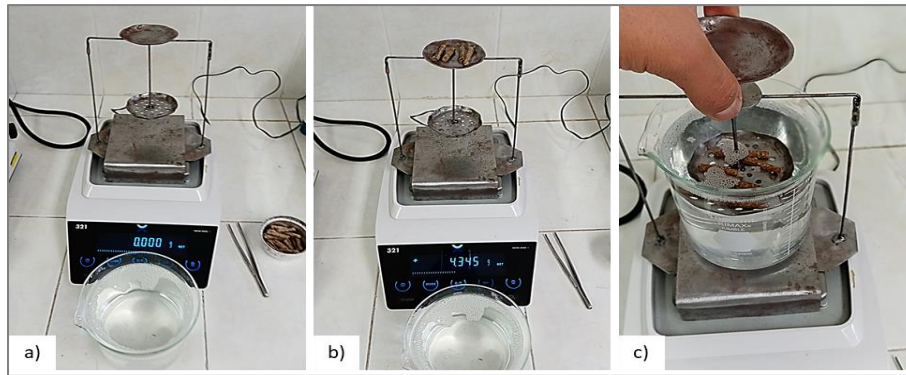
### 7.5.2. Determinación de humedad

El contenido de humedad se determinó utilizando una termobalanza (Adam Equipment, modelo PMB53, Adam Equipment Inc., Oxford, Connecticut, USA) con el que se realizó un ensayo con 1 g de pélets previamente molidos en un mortero, y dos réplicas.

### 7.5.3. Determinación de densidad

La determinación de la densidad de pélets se realizó tanto para la partícula como a granel.

La densidad de partícula de pélets se determinó con base en los criterios de la norma EN 18847 (2017), para lo cual se construyó un dispositivo con las características requeridas para el ensayo (ver Figura 17).



**Figura 17.** Determinación de densidad de partícula de pélet según la norma EN 18847 (2017). a) dispositivo construido adaptado a la balanza de precisión, b) pesada de pélets “al aire”, c) pesada de pélets sumergidos en agua destilada.

Se utilizaron 10 pélets tomados aleatoriamente para cada tipo de pélet (P-CF y P-SF). En el experimento se utilizó Decyl Glucosyde (tensoactivo no iónico), como agente tensoactivo, usado para reducir o eliminar la posible flotabilidad de los pélets (sobre todo de pélets de peso inferior a 1 g). El tensoactivo empleado tiene características muy cercanas al recomendado en la norma.

La densidad a granel de los pélets se determinó siguiendo el método de la norma EN 17828 (2016) utilizando un contenedor de volumen y peso conocidos. Se utilizaron tres muestras para cada tipo de pélet (P-CF y P-SF) por ensayo, el cual consistió en llenar el contenedor con pélets dejándolos caer de una altura aproximada de 20 a 30 cm por encima del borde superior hasta la formación de un cono a la máxima altura posible (ver Figura 18), para después dejar caer el contenedor sobre una superficie de madera a una altura de 15 cm y posteriormente rellenar los espacios vacíos con pélets, eliminando el material sobrante sobre el borde del recipiente (la caída y el rebase se repite tres veces) y finalmente se pesando el contenedor y los pélets contenidos. Para el cálculo de la densidad a granel según se recibe ( $DG_{sr}$ ), es decir al contenido de humedad real, se utilizó la siguiente fórmula:

$$DG_{sr}(a H_{sr}) = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

donde,  $H_{sr}$  = contenido de humedad según se recibe (% masa),  $m_1$  = masa del recipiente vacío (kg)  $m_2$  = masa del recipiente lleno (kg) y  $V$  = volumen neto del recipiente de medida ( $m^3$ ).

Para el cálculo de la densidad a granel en base seca ( $BD_{bs}$ ) se aplicó la siguiente fórmula:

$$BD_{bs} = BD_{sr} \times \frac{(100 - H_{sr})}{100}$$



**Figura 18.** Determinación de densidad a granel. Se muestra el contenedor de volumen conocido empleado en los ensayos de acuerdo con la norma EN 17828 (2016).

#### 7.5.4. Cálculo de la densidad energética

La densidad energética de los pélets obtenidos se determinó una vez calculado el valor del poder calorífico inferior a presión constante, siendo necesario convertir PCS a volumen constante determinado mediante calorimetría según la norma EN 18125 (2018). La comercialización de combustibles de madera para plantas de calefacción a pequeña escala y para uso doméstico suele reportarse en MWh por volumen a granel (EN 17225-1, 2014). El cálculo de la densidad energética se realizó utilizando la fórmula adaptada de la norma EN 17225-1 (2014):

$$DE = \frac{1}{3600} * PCI * DG$$

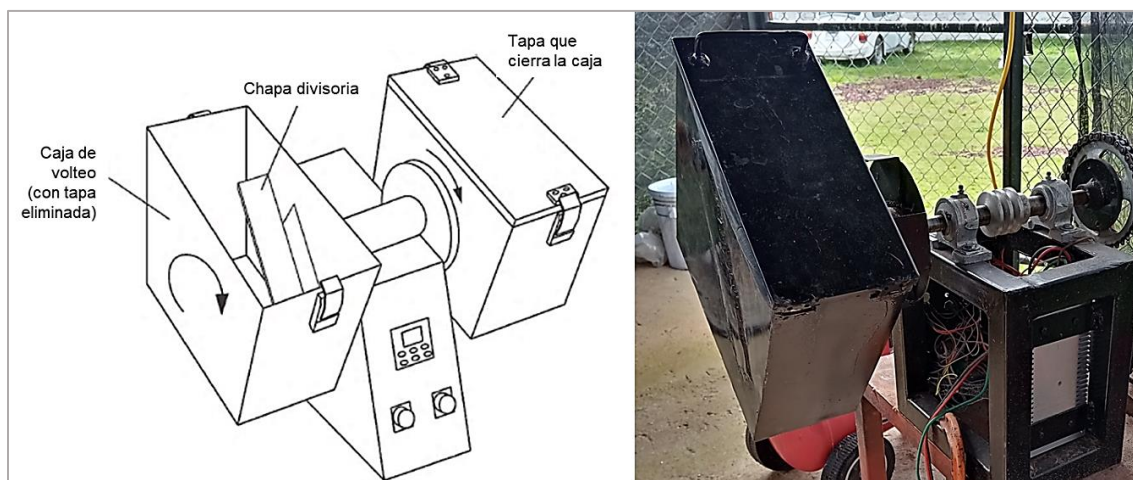
donde, DE es la densidad energética, 1/3600 es el factor de conversión de las unidades de energía (MJ a MWh), PCI es el poder calorífico inferior dado a presión constante (según se recibe) y DG es la densidad a granel (según se recibe) en unidades de  $\text{kg/m}^3$ .

La densidad energética se calculó para cada uno de los pélets obtenidos al contenido de humedad final correspondiente. Además, con la finalidad de poder comparar con resultados de otros estudios, se calculó la densidad energética promedio de ambos pélets por el método directo, multiplicando el promedio del PCS y la densidad a granel (a humedad final de pélets).

#### 7.5.5. Determinación de la durabilidad mecánica

##### 7.5.5.1. Prueba de volteo

La determinación de la durabilidad mecánica mediante la prueba de volteo se realizó en un equipo fabricado por GIRA, A.C., siguiendo las características técnicas requeridas según la norma EN 17831-1 (2016) (ver Figura 19).



**Figura 19.** Equipo para prueba de volteo. A la izquierda se ilustra la configuración del equipo según la EN 17831-1 (2016) y a la derecha se muestra el equipo en GIRA, A.C.

Se realizaron 3 ensayos con 500 g de muestra tamizada (tamiz de apertura 3.35 mm). Se programó el equipo a 50 rpm y se paró hasta alcanzar las 500 vueltas, para finalmente tamizar y pesar los pélets resultantes.

#### 7.5.5.2. Índice de resistencia al impacto (IRI)

Para la determinación del índice de resistencia al impacto se tomaron 20 pélets y se pesaron antes y después de dejarlos caer en cuatro ocasiones de una altura de 1.8 m. Se contaron las piezas resultantes. El cálculo del índice se realizó con la siguiente fórmula (Richards, 1990; Carrillo-Parra *et al.*, 2018):

$$IRI = \left( \frac{N}{n} \right) * 100$$

donde,  $N$  es el número de caídas y  $n$  es número de piezas.

#### 7.6. Evaluación de la calidad de pélets

La calidad de los pélets obtenidos fue evaluada considerando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Dado que no existen normas mexicanas en materia de biocombustibles sólidos, la calidad de los pélets fue evaluada con base en estándares internacionales, particularmente la norma española EN 17225-2 (2014) y el manual de la certificación *ENplus®*. Las especificaciones de la norma y la certificación se abordan en la sección 5.7. “Caracterización de pélets biocombustibles y su calidad”.

No se contempla el parámetro de porcentaje de finos para esta evaluación ya que es un parámetro que se relaciona con las condiciones a las que se somete el producto en su comercialización (manipulación, transporte y almacenamiento). El parámetro de temperatura de pélets no fue considerado ya que este es medido en los puntos de entrega en la comercialización del producto. Por otro lado, la temperatura de fusión de cenizas no fue determinada en este estudio ya que no se tuvo disponibilidad de los equipos apropiados para la determinación de este parámetro.

### 7.6.1. Índice de calidad de pélets (ICP)

Con la finalidad de tener un indicador de referencia sobre la calidad de los pélets obtenidos y comparar con la calidad de pélets de otras fuentes de biomasa reportados en la literatura, se calculó un índice de calidad con base en la metodología desarrollada por Cherney & Verma (2013), mediante la cual se evalúan algunos de los parámetros mecánicos, físicos, químicos y energéticos más importantes en cuanto a calidad de pélets. Con base en esta metodología, en el presente estudio, se seleccionaron 7 parámetros de calidad para el cálculo de un índice de calidad de pélets (ICP).

Para la aplicación de este método se determina inicialmente un índice por parámetro (IP) basado en la selección de parámetros de calidad y sus valores de referencia. Los valores de referencia se basan, por un lado, en valores promedio de los parámetros de interés, tomados de un estudio realizado por Pollex *et al.* (2018), donde caracterizan un número entre 167 y 249 pélets comerciales producidos en Europa (mayoritariamente en Alemania), en la mayoría de los casos fueron pélets de alta calidad con certificación alemana *DINplus* A1 (certificación equivalente a la versión española *ENplus*). Por otro lado, se fijan valores máximos y mínimos que se basan en las especificaciones de la norma EN 17225-2 (2014) para pélets de madera. A continuación, se presenta la fórmula empleada para la obtención del IP (Cherney & Verma, 2013; Rocha *et al.* 2020):

$$IP = \left( \frac{x_{medido} - x_{promedio}}{x_{max/min} - x_{promedio}} \right)$$

donde,  $x_{medido}$  es el valor medido del parámetro  $i$ ,  $x_{promedio}$  es el valor promedio para cada parámetro y  $x_{max/min}$  valor máximo o mínimo especificado en la norma para cada parámetro.

En la Tabla 3, se presentan los valores de referencia seleccionados para este estudio.

**Tabla 3**

*Parámetros de calidad más importantes en pélets. Parámetros seleccionados para la determinación del ICP y sus rangos de trabajo.*

Parámetro	Valor promedio <sup>a)</sup>	Max/min valor <sup>b)</sup>
Densidad a granel (kg/m <sup>3</sup> )	653	600
Durabilidad mecánica (%)	99	97.5
Humedad (%)	6	10
Cenizas (%)	0.4	0.7
PCI (MJ/kg)	17.7	16.5
N (%)	0.11	0.3
S (%)	0.008	0.04

<sup>a)</sup>Referencia: Pollex *et al.* (2018).

<sup>b)</sup>Referencia: norma EN 17225-2 (2014), clase A1.

Para el cálculo del ICP se utilizó la siguiente fórmula (Cherney & Verma, 2013; Rocha *et al.*, 2020):

$$ICP = \sum_{i=1}^7 IP_i$$

donde, ICP es el resultado de la sumatoria del índice de calidad de los 7 parámetros evaluados. Un índice bajo indica una mejor calidad de la biomasa para el rango de trabajo.

El cálculo del IP y del ICP se realizó para los pélets de poda de aguacate (P-CF y P-SF) asumiendo que la composición química es la misma, difiriendo únicamente en los parámetros de humedad, densidad a granel y durabilidad mecánica. El IP e ICP también fueron calculados para pélets reportados en la literatura recientemente que proceden de diferentes fuentes de biomasa: poda de vid (Toscano *et al.*, 2018), poda de árbol de avellana (Acampora *et al.*, 2021), poda de árbol de olivo (Acampora *et al.*, 2021; Kougioumtzis *et al.*, 2021), cáscara de semilla de girasol (Kougioumtzis *et al.*, 2021) y restos de café molidos (Woo *et al.*, 2021). Algunos de los pélets de referencia, que no proceden de fuentes leñosas, sirven de referencia para contrastar las distintas calidades de biomasa, teniendo a consideración que algunas fuentes no leñosas suelen ser de menor calidad.

#### 7.6.2. Usos potenciales de los pélets

A partir de la evaluación de calidad de los pélets obtenidos, se analizaron los potenciales usos, ya sea para el sector residencial o comercial, o bien para un uso industrial. Además, de generar una propuesta de uso en la región de estudio.

#### 7.7. Análisis estadístico

En análisis estadístico de los datos fue realizado mediante el software Statistica 10 y OriginPro-Graphing & Analysis, 2018, este último sólo para los datos del análisis termogravimétrico.

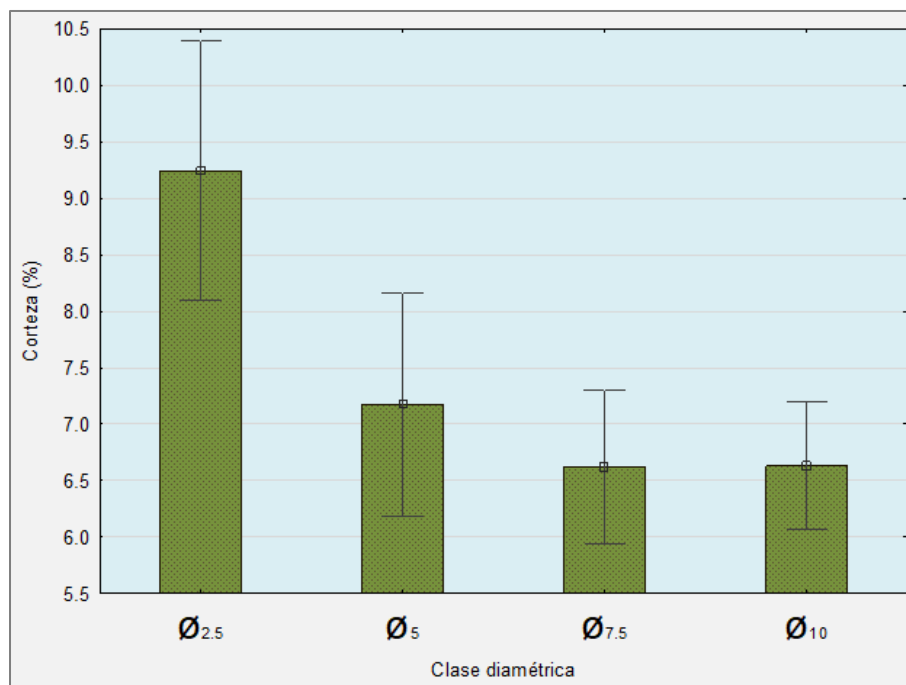
Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, se comprobó la normalidad y homocedasticidad de los datos, respectivamente. Para comprobar diferencias estadísticamente significativas entre las clases de biomasa y las clases de pélets analizadas, se realizó una prueba t de grupos independientes para el porcentaje de corteza, humedad total, diámetro de pélets, humedad final de pélets, densidad de partícula, densidad a granel, durabilidad mecánica e índice de resistencia al impacto (IRI). Para el contenido de cenizas y el poder calorífico que presentaron una distribución normal, se realizó un ANOVA seguido de una prueba post hoc HSD de Tukey para comparaciones múltiples e identificar diferencias significativas entre las clases de biomasa. Finalmente, para el contenido de volátiles, dado que una de las clases no presentó una distribución normal, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para comprobar las diferencias significativas. El nivel de significancia para todos los casos fue  $\alpha=0.05$ .

## 8. Resultados y discusión

### 8.1. Caracterización de biomasa

#### 8.1.1. Porcentaje de corteza en ramas

En la Gráfica 1, se presentan las medias de los porcentajes de corteza calculados para las cuatro clases diamétricas analizadas. En la gráfica se observa como el porcentaje de corteza se ve disminuido a medida que aumenta el diámetro de la rama.



**Gráfica 1.** Porcentaje de corteza por clase diamétrica. Los bigotes representan  $\pm$  la desviación estándar.

La media del porcentaje de corteza para las clases Ø<sub>2.5</sub>, Ø<sub>5</sub>, Ø<sub>7.5</sub> y Ø<sub>10</sub> fueron 9.4, 7.2, 6.62 y 6.63 %, respectivamente (Gráfica 1). La clase Ø<sub>2.5</sub> es la que muestra una mayor dispersión entre los valores calculados seguido de la clase Ø<sub>5</sub>, teniendo una desviación estándar de 2.29 y 1.98 %, respectivamente. Mediante inspección visual en campo se identificaron ramas jóvenes y viejas en una misma clase diamétrica, siendo las ramas gruesas las que presentaban mayor corteza, esto se observó en las clases diamétricas Ø<sub>2.5</sub> y Ø<sub>5</sub>. Según Hartmann (2019), en la madera joven existe un mayor contenido de corteza, lo cual concuerda con lo observado en este estudio. Al comparar el porcentaje de corteza para las clases diamétricas Ø<sub>2.5</sub> vs. Ø<sub>10</sub> mediante el coeficiente de correlación Pearson, se encontró una correlación positiva débil de  $r = 0.13$  ( $p < 0.05$ ). Para el caso de las clases Ø<sub>7.5</sub> y Ø<sub>10</sub>, no se encontró diferencia significativa entre sus medias, por lo que en promedio se obtuvo un valor de 6.63 % con desviación estándar de 1.24 %.

Según Fengel & Wegener (1989), el volumen que constituye la corteza en el tallo de un árbol, varía entre 5 y 8 %. Sin embargo, este rango puede ser aún más amplio, de 8 hasta un 25 %, ya que existen varios factores que tienen influencia en esta variación, por ejemplo, el diámetro del tallo, la especie analizada (Smith & Kozak, 1967 citado por Xing *et al.*, 2007; Miles, 2009), la ubicación geográfica de dicha especie, así como la edad (Fengel & Wegener,

1989). No obstante, se ha encontrado que generalmente la corteza abarca un 10 % del volumen del tallo en promedio (Busquets-Ferrer *et al.*, 2021). En un estudio realizado por Hoong *et al.* (2009) coinciden con un porcentaje aproximado de 10 % de corteza para la especie *Acacia mangium*. Velázquez-Martí *et al.* (2017), han reportado el porcentaje de corteza de algunas especies de árboles frutales, a saber, naranjo (15.038%), olivo (16.469 %) y almendro (24.741%), con desviaciones estándar de 3.688%, 4.297% y 6.485%, respectivamente, teniendo un valor en promedio (18.74%), el cual resulta 2.5 veces mayor a la media obtenida en el presente estudio. En este estudio se encontró una diferencia significativa entre las clases diamétricas (con excepción de  $\emptyset_{7.5}$  y  $\emptyset_{10}$ ), teniendo un porcentaje mayor de corteza en la clase  $\emptyset_{2.5}$ , donde, según la tendencia de la Gráfica 1, a menor diámetro de las ramas, el porcentaje de corteza aumenta. En este sentido, a diferencia del estudio realizado por Velázquez-Martí *et al.* (2017), aquí no se determinó el porcentaje de corteza de diámetros inferiores a 2.5 cm, de ser analizados y, según la tendencia observada, el porcentaje de corteza determinado para dichas fracciones pudiera ser aún mayor.

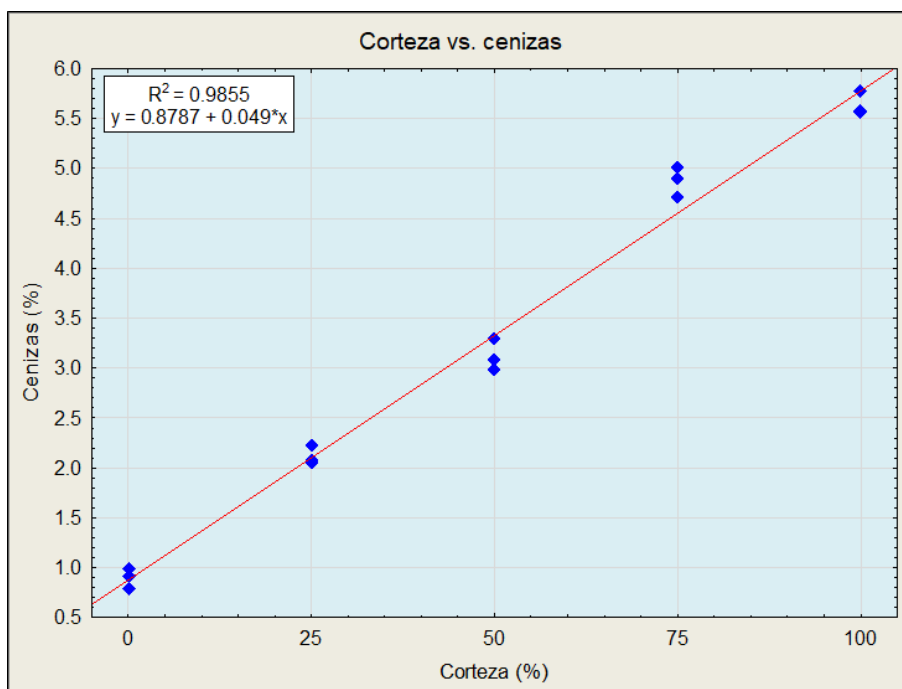
En la literatura se ha evidenciado la influencia del contenido de corteza respecto a la calidad de biocombustibles sólidos. Por ejemplo, la corteza generalmente necesita una temperatura más alta para ser quemada (Toscano *et al.*, 2013; Krigstin & Wetzell, 2016). Filbakk *et al.* (2011) realizaron un estudio donde analizan el efecto del contenido de corteza en los parámetros de calidad de pélets de pino, en sus resultados se logra apreciar como un mayor contenido de corteza representa los valores más altos en contenido de carbono y poder calorífico. Sin embargo, en otro estudio realizado por Martínez-Pérez *et al.* (2015) donde caracterizaron albura, duramen y corteza de 10 especies de maderas mexicanas (incluida *Persea americana*), determinaron que la media general del PCS es mayor para el duramen, seguido de la albura y como el valor más bajo se encuentra la corteza. Lo anterior sugiere que, además de la especie, el valor del poder calorífico está relacionado con otras propiedades de la biomasa.

#### 8.1.2. Relación entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas

En la gráfica 2 se presenta la curva representativa del porcentaje de corteza a distintas proporciones y el contenido de cenizas. Aquí se observa una correlación lineal corteza-cenizas con un coeficiente de determinación fuerte ( $R^2 = 0.98$ ). La ecuación de ajuste de la recta es:  $y=0.8787+0.049*x$ , siendo “y” porcentaje de cenizas y “x” porcentaje de corteza.

Del análisis de resultados, se pudo observar en primer lugar, que, el contenido de cenizas en la corteza es mayor que el correspondiente al de madera sin corteza, para lo cual, otros estudios soportan también este hecho, ya sea que se trate de madera de coníferas o latifoliadas, incluyendo madera de árboles frutales (Klasnja *et al.*, 2002; Rhén, 2004; Filbakk *et al.*, 2011; Orémusová *et al.*, 2014; Martínez-Pérez *et al.*, 2015; Nosek *et al.*, 2016; Cichy *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Kamperidou *et al.*, 2018). También se puede concluir que, existe una relación directamente proporcional entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas.

A partir de la ecuación de la recta, se pudo calcular el porcentaje de cenizas teórico para la clase R en 1.24 %, cuyo porcentaje de corteza promedio es de 7.42 %.



**Gráfica 2.** Curva de correlación lineal entre el porcentaje de corteza y porcentaje de cenizas.

El contenido de cenizas es uno de los parámetros más importantes en cuanto a la calidad de biomasa como biocombustible sólido, donde, las concentraciones altas no son deseables para el uso de la biomasa. En la literatura se ha reportado que, las ramas de diferentes diámetros pueden presentar una composición de cenizas distinta, esto se ha atribuido al hecho de que existe una mayor actividad biológica en ramas de menor diámetro y, por tanto, se presentan mayores concentraciones de minerales (Abdoli *et al.*, 2018). Un contenido alto en cenizas puede ser debido a factores extrínsecos a la naturaleza de la biomasa, por ejemplo, en la recolección en campo, las propias condiciones de manejo pueden propiciar la contaminación con suelo o tierra (de forma involuntaria) al transportar cierta carga de materia mineral, la cual fácilmente puede quedar depositada en los espacios vacíos de la corteza principalmente (Nogués *et al.*, 2010; Kenney *et al.*, 2013; Kuchler *et al.*, 2019).

### 8.1.3. Determinación de contenido de humedad total

La humedad total contenida en la biomasa para las clases R fue de 63.74 % con una desviación estándar de 1.65 % mientras que para la clase RPH fue de 68.41 % con una desviación estándar de 1.37 %, donde se determinó una diferencia estadísticamente significativa entre ambas fracciones de biomasa mediante una prueba t para grupos independientes ( $p < 0.05$ ). Esto también ha sido también reportado en otro estudio, donde, además, se encontró una diferencia significativa entre la humedad de troncos de madera de aguacate (diámetro > 10 cm) y ramas de diámetros de alrededor a 2.5 cm (Soria-González, 2019). Esto último puede explicarse debido a que, es en las células de la madera temprana de la albura donde se da principalmente el transporte del agua en la planta viva (Gracia, 2011; Fromm, 2013).

El contenido de humedad de los combustibles de biomasa es muy variable, es por ello que los biocombustibles se evalúan respecto a la base seca de materia. Generalmente, en madera

forestal fresca, los porcentajes de humedad suelen estar entre 45 y 60 % (Burmester, 1980; Hartmann, 2019). Según Velázquez (2018), la humedad de los materiales lignocelulósicos recién cortados suelen estar alrededor del 50 %, sin embargo, para el caso de algunos residuos de frutales se han reportado valores de 68 y 75 % para ramas y hojas de árbol de guayaba, respectivamente (Camarena-Tello *et al.*, 2015), por otro lado, se ha reportado hasta un 84 % de humedad en residuos de poda de árbol de pera (Winzer *et al.*, 2017), por lo que el contenido de humedad depende de manera importante de la fuente específica de biomasa. Según Hartman (2019), esta variabilidad afecta el poder calorífico, ya que el contenido de humedad y el poder calorífico tienen una influencia directa, estos dos parámetros guardan entre sí una correlación lineal. La humedad es una de las limitaciones que tiene un biocombustible para su uso directo, al afectar parámetros como la densidad y el poder calorífico, además de su influencia en la eficiencia de la combustión (Bajwa *et al.*, 2018; Velázquez, 2018). En este sentido, el peletizado es una alternativa más eficiente para el aprovechamiento energético de la biomasa, al incluir como una de las etapas esenciales, la eliminación del exceso de humedad.

#### 8.1.4. Análisis proximal y poder calorífico

En la Tabla 4, se presentan los resultados del análisis proximal y poder calorífico obtenidos para las clases R, RPH, RSC y la clase C.

**Tabla 4**

*Análisis proximal y valor calorífico de clases R, RPH, R-SC y C. Media de los datos (n=3) ± desviación estándar, reportados en base seca (con excepción de humedad).*

Clase	Análisis proximal (% en peso)				Valor calorífico (MJ/kg)
	Humedad	Cenizas	Volátiles	*Carbono fijo	PCS
R	6.57±0.27	1.22±0.04 <sup>a</sup>	83.87±0.64 <sup>a</sup>	8.34±0.55 <sup>a</sup>	19.61±0.12 <sup>a</sup>
RPH	7.39±0.26	7.22±0.10 <sup>b</sup>	75.80±1.84 <sup>ab</sup>	9.59±1.96 <sup>a</sup>	-
R-SC	2.77±0.08	0.89±0.10 <sup>c</sup>	86.38±0.97 <sup>ac</sup>	9.96±1.09 <sup>a</sup>	19.30±0.48 <sup>a</sup>
C	10.05±0.27	5.64±0.12 <sup>d</sup>	80.17±0.86 <sup>a</sup>	4.14±0.75 <sup>b</sup>	20.12±0.41 <sup>a</sup>

Nota. \*Valor calculado: Carbono fijo = 100% – (humedad + cenizas + volátiles). Diferentes letras (a, b, c y d) denotan una diferencia estadísticamente significativa entre grupos, determinada a partir de la prueba Tukey HSD (p<0.05) para cenizas y valor calorífico que presentaron una distribución normal y, Kruskal-Wallis (p<0.05) para contrastar el contenido de volátiles.

Los porcentajes de humedad presentados en la Tabla 4, fueron los obtenidos para las muestras utilizadas en el análisis de cenizas, volátiles y PCS, dichos valores sirvieron para las correcciones por humedad correspondientes a cada análisis. El contenido de cenizas y el contenido de volátiles presentaron diferencias significativas entre grupos (p<0.05), no así para el valor calorífico.

El contenido de cenizas de ramas (clase R), difiere mayormente de ramas pequeñas y hojas (clase RPH) en un 6%, sin embargo, frente a ramas sin corteza (clase R-SC) solamente difiere en un 0.3 % (ver Tabla 4). El mayor porcentaje de cenizas encontrado en la clase RPH respecto a la clase R, se le atribuye a la presencia de hojas, lo cual coincide con lo reportado por, Solano y Mendoza (2014), Camarena-Tello *et al.* (2015) e Ivanova *et al.* (2018) en la determinación de cenizas en residuos de poda de guayaba, donde, difieren los rangos de valores obtenidos para las fracciones por separado de ramas (1.27 – 4.94 %) y hojas (5.33 –

8.20 %). En otro estudio reciente el contenido de cenizas en ramas de poda de guayaba se reportó en 1.67 % (Ruíz-García *et al.*, 2022). Para la clase C se encontró mayor contenido de cenizas que la clase R y la clase R-SC, es decir, la corteza tiene mayor contenido de cenizas que la madera de la que procede, lo cual concuerda otros estudios (Klasnja *et al.*, 2002; Rhén, 2004; Filbakk *et al.*, 2011; Orémusová *et al.*, 2014; Martínez-Pérez *et al.*, 2015; Nosek *et al.*, 2016; Cichy *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Kamperidou *et al.*, 2018). Se han reportado algunos rangos de valores típicos de contenido de cenizas en astillas de madera con corteza (1 – 2.5 %), astillas de madera sin corteza (0.8 – 1.4 %) y corteza sola (5 – 8 %) (Tumuluru *et al.*, 2012). Para cada uno de los rangos mencionados, las clases caracterizadas en este estudio se pueden considerar dentro de los valores típicos. El contenido de cenizas ha sido reportado para diferentes partes del árbol de aguacate: ramas (0.88 – 3.17 %) (Bernabé, 2011; Solano y Mendoza 2014; Pérez-Arévalo *et al.*, 2015; Paniagua *et al.* 2021), ramas y hojas (3.03%) (Solano y Mendoza, 2014), corteza (1.43 %), albura (0.47%) y duramen (0.42%) (Martínez-Pérez *et al.*, 2015), tocón (0.32 %) y fuste (2.29%) (Bernabé, 2011). De los estudios previos se aprecia como rango de valores para el contenido de cenizas se amplía dependiendo de la parte específica del árbol de aguacate analizada. Una biomasa con alto contenido en cenizas no es favorable para su uso como biocombustible sólido ya que ello puede tener influencia en el poder calorífico y reducir su valor debido a que se trata de una fracción inerte, lo que origina pérdidas por la deficiencia en la combustión (García *et al.*, 2014; Nogués, 2010), por lo que el contenido elevado en cenizas de la clase RPH (7.2 %) lo vuelve poco atractivo para su aprovechamiento, sin embargo, frente a otro tipo de combustibles de origen fósil como el carbón mineral (turba, lignito, carbón bituminoso, carbón sub-bituminoso), este valor es relativamente bajo, ya que el carbón mineral suele abarcar un amplio rango de valores que va desde el 1% hasta cerca de un 49 % de cenizas (Agbor *et al.*, 2014; Vassilev *et al.*, 2015).

El contenido de volátiles de las cuatro clases analizadas presentaron entre sí una diferencia estadística significativa, sólo con excepción de las clases R y C (Tabla 4). En la literatura se ha reportado el contenido de volátiles para madera de aguacate en un rango de 79.4 – 82.4 % (Paniagua *et al.*, 2021). El contenido de volátiles de las clases R y R-SC son superiores al rango referenciado. Recientemente, se ha reportado el contenido de volátiles para algunas especies de maderas de latifoliadas y coníferas (77.06 – 90.95 %) (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020; Ramírez-Ramírez *et al.*, 2022), y algunas especies de frutales (77.43 – 90.50 %) (Ivanova *et al.*, 2018; Brand & Jacinto, 2020; Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020; Carrillo-Parra *et al.*, 2021). De los valores referenciados, se puede observar como el rango reportado para frutales es muy cercano al de las coníferas y latifoliadas, y los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango. Según Kataki & Konwer (2002), el elevado contenido de materia volátil en madera, está asociada con un gran número de grupos funcionales y un menor número de estructuras aromáticas. Algunos autores indican que, niveles altos de volátiles favorecen la conversión térmica de la biomasa por lo que lo vuelven un material apropiado para su aprovechamiento energético (Olsson & Kjällstrand, 2004; Holt *et al.*, 2006; Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Además, la combustión de la biomasa se da más rápidamente cuanto mayor sea el contenido de materia volátil (Sirignano, 1986; Kataki & Konwer, 2002; Demirbas, 2004; Koppejan & van Loo, 2007) y, por el contrario, un contenido bajo en volátiles está asociado con la generación de humos y gases tóxicos (Koppeja & van Loo, 2007). Sin embargo, un nivel alto en volátiles y una rápida combustión no siempre es necesariamente favorable para un combustible (Kataki & Konwer, 2002), por ejemplo, en

procesos de co-combustión un alto contenido de volátiles influye en las condiciones locales de la combustión, en la mezcla de aire-combustible, la formación de hollín y en el fenómeno de radiación térmica, por lo que es necesario tener en cuenta el impacto de las demás propiedades físicas y químicas de la biomasa de importancia para fines energéticos (Tumuluru, 2020).

El contenido de carbono fijo en la biomasa estudiada se encontró por debajo del 10 %, donde la clase R-SC presentó el valor más alto (9.96 %) y la clase C el más bajo (4.14 %) (ver Tabla 4). Para madera de poda de aguacate se ha reportado en la literatura un rango de valores que oscila entre 10.9 y 13.8 % (Paniagua *et al.*, 2021), el cual se encuentra por arriba de los valores correspondientes para la madera o clase leñosa (clases R y R-SC) de este estudio. Se ha reportado recientemente el contenido de carbono fijo en un amplio rango de valores para distintas fuentes de madera (7.82 – 20.44 %) (Brand & Jacinto, 2020; Carrillo-Parra *et al.*, 2021; Ramírez-Ramírez *et al.*, 2022), y un rango más estrecho para frutales (15.13 – 19.57 %) (Brand & Jacinto, 2020; Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020; Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Los rangos de valores referenciados, también se encuentran por arriba de la clase R y R-SC aquí analizados. El carbono fijo es la fracción resultante de la eliminación de la humedad, contenido de cenizas y la materia volátil contenidas en la biomasa, dicha fracción, produce carbón que se quema como material sólido en el sistema de combustión empleado para su aprovechamiento energético (Kreil & Brokema, 2010). En este sentido, Voca *et al.* (2016) sugiere que altos niveles de carbono fijo tendrán un impacto positivo en la combustión. Un mayor contenido de carbono fijo se ha asociado con un mayor poder calorífico (Tenorio *et al.*, 2015; Forero *et al.*, 2015), inclusive cuando se busca mejorar la calidad de la biomasa, por ejemplo, mediante la torrefacción, el aumento en carbono fijo es indicativo de un procesamiento óptimo (Rocha *et al.*, 2020). No obstante, como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo, el valor calorífico puede estar influenciado por otros factores.

El valor calorífico (PCS) determinado para las clases R, R-SC y C, no presentaron diferencias significativas, teniendo un valor promedio de 19.67 MJ/kg. Algunos autores han reportado valores de PCS más altos en corteza que en madera (Filbakk *et al.*, 2011; Zanetti *et al.*, 2021). El PCS determinado para la clase R es muy cercano al valor típico encontrado para materiales leñosos vírgenes de residuos de corta, específicamente para madera de frondosas (19.7 MJ/kg) según la clasificación de la EN 17225-2 (2014), además, se encuentra en la porción superior del intervalo de valores reportados en la literatura para biomasa leñosa de árboles frutales (15.31 – 20.5 MJ/kg) (García *et al.*, 2014; García-Maraver, 2015; Ivanova *et al.*, 2018; Brand *et al.*, 2018; Picchi *et al.*, 2018; Soria-González, 2019; Brand & Jacinto, 2020; Mondragón-Valero *et al.*, 2018; Rutiaga-Quñones, *et al.*, 2020; Acampora *et al.*, 2021; Bianchini *et al.*, 2021; Kougioumtzis *et al.*, 2021; Carrillo-Parra *et al.*, 2021; Ruíz-García *et al.*, 2022). Otros estudios reportan valores entre 19.26 y 19.57 MJ/kg, para madera de poda de aguacate (Paniagua *et al.*, 2021), muy similares a los del presente estudio y de 19.9 MJ/kg reportado para madera en general (Zavala *et al.*, 2018). Pérez-Arévalo *et al.* (2015) caracterizaron la madera y hojas de aguacate, donde, el PCS obtenido se encontró en un rango de 10.52 – 11.82 MJ/kg para las ramas y de 17.12 – 17.70 MJ/kg para hojas, en el caso de las ramas, se encuentran muy por debajo del valor obtenido en el presente estudio, también se observa que la diferencia entre las dos fracciones analizadas es importante siendo 1.5 veces mayor la fracción de hojas. A partir de esta observación, se puede inferir que el PCS de la clase RPH tuviera un mayor valor que la clase R.

La fuente específica de la biomasa es la que determina entre otras de sus propiedades, el contenido de cenizas y el PCS, esto tanto si se trata de madera de coníferas o latifoliadas o bien, si se trata de especies diferentes, adicionalmente, dependerá de la parte específica del árbol que se analiza, como puede ser el tocón, duramen, albura, ramas, hojas o acículas, corteza, etc. (Rhén, 2004; Filbakk *et al.*, 2011; Orémusová *et al.*, 2014; Martínez-Pérez *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018; Nosek *et al.*, 2016). Sin embargo, hay otros factores que podrían tener influencia, por ejemplo, según Tumuluru *et al.* (2012), tanto la composición química de la biomasa como el contenido de cenizas suelen depender de las condiciones de crecimiento de las plantas, donde se incluyen factores como el tipo de suelo y la calidad del agua. Por su parte, Paniagua *et al.* (2021), analizaron la influencia del manejo del cultivo de aguacate particularmente en cuanto al tipo de fertilización mineral frente a la orgánica, así como la variedad de aguacate (Bacon y Hass), como resultado se encontró que la fertilización orgánica, favorece a la mayoría de las características combustibles, aunque con independencia de la variedad.

En cuanto a la calidad de pélets biocombustibles, el contenido de cenizas en biomasa es uno de los parámetros más importantes a evaluar, esto debido a las distintas implicaciones que tiene en los procesos de combustión. Un contenido de cenizas alto es indeseable para cualquier sistema de aprovechamiento térmico, ya que este puede provocar ensuciamiento, corrosión, escorias o incrustaciones en los equipos (Nunes *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2021). En calderas domesticas se ha encontrado que el contenido de cenizas alto, ya sea en pélets o astillas de madera traen consigo problemas de escoriación que se produce por una aglomeración de cenizas que pueden disminuir la eficiencia de la caldera o incluso dañarla (Miles *et al.*, 1996; Toscano *et al.*, 2013; Vega-Nieva *et al.*, 2015; Nunes *et al.*, 2016). Las cenizas pueden generar depósitos que, por un lado, dificultan o ralentizan la transferencia de calor, pero también pueden ser causantes de averías mecánicas y corrosión en los equipos de combustión utilizados (Szemmelveisz *et al.*, 2009; Nunes *et al.*, 2016). En calderas industriales, los altos niveles de cenizas, pueden generar mayores costos en el mantenimiento de equipos empleados en la combustión, ya sea por los depósitos de escoria, la erosión de los equipos o por la misma manipulación de los residuos y control de emisiones, puesto que para la liberación de los gases a la atmósfera deben filtrarse el material particulado para el cumplimiento de las legislaciones pertinentes (Nogués, 2010; García *et al.*, 2014).

#### 8.1.5. Análisis elemental

A partir del análisis elemental realizado, se obtuvieron los valores de C, H, O, N y S dados en porcentaje en peso (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Composición elemental en biomasa de las clases R y RPH.*

Clase	Composición elemental (% en peso)				
	C	H	O	N	S
R	46.95	5.95	46.27	0.81	< 0.01
RPH	46.26	6.01	43.84	1.98	1.88

Nota. Los valores reportados son libres de cenizas. El contenido de oxígeno se calculó por diferencia.

En la Tabla 5, se puede observar cómo los valores respectivos de R respecto a RPH son superiores para C y O, mientras que contiene un menor contenido de H, N y S. Para la clase R, el contenido de N determinado es relativamente bajo ( $< 0.1\%$ ) y el contenido de S es bajo ( $< 0.05\%$ ), lo cual es deseable para su uso como BCS (Hartmann, 2019; EN 17225-2, 2014).

Paniagua *et al.* (2021) reportaron valores entre 0.28 y 0.56 % de contenido de N para ramas de poda de aguacate y entre 0.02 y 0.03 % de S. Solano y Mendoza (2014) caracterizaron residuos de aguacate separando las fracciones que denominaron como poda y ramas, cuyo contenido de N para cada fracción fue de 1.45 y 0.45 % respectivamente, mientras que el contenido de S fue de 0.15 para poda y 0.04 % para ramas. Aunque no se aclara explícitamente en el estudio, la clasificación de poda y ramas hecha por Solano y Mendoza (2014) es muy similar a la realizada en el presente trabajo, donde la clasificación “poda” se asemeja a la clase RPH al contemplar ramas de diámetros pequeños y hojas, y la clase “ramas” correspondería a la clase R. En este sentido, se puede explicar para ambos estudios como las concentraciones de N y S son superiores para las fracciones que comprenden a las hojas de aguacate. Según Hartmann (2019), para algunas herbáceas, la fertilización podría tener un efecto en el contenido de nitrógeno, aumentándolo. El efecto de los fertilizantes en la concentración de nitrógeno puede ser particularmente cierto para la clase RPH de este estudio, ya que el manejo de este cultivo suele ser intensivo en cuanto a la fertilización. De manera similar, el contenido de azufre en biomasa dependerá de forma importante de la composición molecular, encontrándose generalmente valores más altos en biomasa que proviene de cultivos de campo que requieren fertilización y valores inferiores que la biomasa de bosques o de cultivos que no son fertilizados o muy poco (Oberberger, 1998; Hartmann, 2019).

En algunas maderas blandas y maderas duras los rangos típicos que se han reportado están entre 0.17 a 0.55 % de N y 0.02 a 0.05 % para S, donde las maderas duras suelen tener las mayores concentraciones, mientras que, para algunas herbáceas, presentan concentraciones en el rango de 0.35 a 1.38 % de N y de 0.04 a 0.14 % de S (Tumuluru, 2020). En la literatura se ha reportado también, la composición elemental para biomasa de madera, corteza y ramas procedente de poda de 9 árboles frutales, donde, el contenido de S para las tres clases mencionadas siempre fue  $< 0.01\%$ , en tanto que, el contenido de N para cada uno de los frutales fue superior en la corteza (rango entre 0.7 y 1.6 %), respecto a la madera (entre 0.3 y 0.5 %) y ramas (entre 0.05 y 1.1 %) (Cichy *et al.*, 2017). Camarena-Tello *et al.* (2015) reportan valores para el contenido de S en ramas y hojas de guayaba en un rango de 2.45 a 3.70 % y de 2.97 a 5.12 %, respectivamente, donde se tuvo como variable la altitud (msnm) a la que se encontraba el cultivo. Para la poda sola de ramas de este mismo cultivo reportado por Solano y Mendoza (2014) y por Ivanova *et al.* (2018), se encontró un rango de 0.68 a 1.64 % de N y de 0.063 a 0.14 % de S. En combustibles sólidos de origen fósil como el carbón mineral suele encontrarse contenido de N mayor al de la biomasa comprendiendo rangos entre 0.5 y 2.9 % y de igual forma, para el caso del S cuyo contenido puede oscilar entre 0.2 y 9.8 % (Agbor *et al.*, 2014; Vassilev *et al.*, 2015).

El contenido de N se asocia con el aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub>, por lo que, se puede esperar que los límites de emisiones de NO<sub>x</sub>, sean superados cuando hay concentraciones superiores al 0.6 % de N en biocombustibles sólidos (Oberberger *et al.*, 2006). El contenido de nitrógeno también puede estar relacionado con la formación de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) que

es un gas de efecto invernadero (GEI) (Hartmann, 2019). Algunas fuentes de combustión en interior como cocinas y calentadores a gas pueden producir  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_x$  que pueden generar efectos adversos en la salud humana, donde, dependiendo de los tiempos de exposición, así como las concentraciones en el medio ambiente local pueden representar un riesgo importante a la salud (World Health Organization, 1997; Schlesinger & Lippmann, 2020). Por lo anterior, el uso de biomasa con altas concentraciones de N y sus consecuentes emisiones tras su combustión, podrían también tener implicaciones en la salud humana, por ejemplo, en el sector residencial sin una ventilación apropiada.

Existen muchos avances en cuanto a técnicas de desnitrificación de biomasa, las tres técnicas principales descritas son: 1) técnica de precombustión, que básicamente consiste en utilizar mezclas de biomasa con concentraciones reducidas de N total, 2) técnicas de control de la combustión (medidas primarias), la cual plantea la modificación del diseño y las características de funcionamiento de los equipos de combustión utilizados y 3) técnicas de postcombustión (medidas secundarias), que es el tratamiento de gases generados después del proceso de combustión (Mladenović *et al.*, 2018). Por otro lado, recientemente se ha validado un método sobre el efecto sinérgico del uso de mezclas de distinto tipo de biomasa y el uso de aditivos, esto con la finalidad de reducir emisiones de NO (Han *et al.*, 2021).

En cuanto al contenido de S, este se asocia con un aumento en la corrosión como la que se puede dar en la superficie de un intercambiador de calor, lo cual se puede presentar cuando existen concentraciones altas de  $\text{SO}_2$  en los gases de combustión (Oberberger, 1998). Sin embargo, algunos autores sugieren que, si bien se podría esperar que un aumento en la concentración de S pudiera generar mayores emisiones de  $\text{SO}_x$ , las emisiones reales pueden verse disminuidas por la presencia de Ca al reaccionar con S (Vasileiadou *et al.*, 2021), además, la liberación del azufre se ve influenciada por la presencia de K, Si y Cl (Han *et al.*, 2019).

La corteza también ha sido analizada en cuanto a las emisiones generadas durante la combustión, donde se ha atribuido mayores concentraciones de emisiones de  $\text{NO}_x$  y CO, al aumentar el contenido de corteza en pélets de pino (Filbakk *et al.*, 2011). El aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , se atribuye a las mayores concentraciones de N en la corteza (Oberberger & Thek, 2004), mientras que en el caso de las emisiones de CO pueden ser debidas a una combustión incompleta (Filbakk *et al.*, 2011). De manera general, la corteza es un material indeseado en los pélets de madera debido a su contenido de N y S (Oberberger & Thek, 2004; Filbakk *et al.*, 2011).

La composición elemental de la biomasa también está relacionada con su poder calorífico, según Gaur & Reed (1998), el PCS se relaciona de manera positiva con las concentraciones de carbono, hidrógeno y azufre, pero negativamente con la concentración de N y O. Más recientemente Velázquez-Martí *et al.* (2017) sugieren también que, un mayor contenido de carbono proporciona valores caloríficos mayores, razón por la cual utilizan en su estudio la variable C (carbono) para la predicción del PCS utilizando distintos modelos matemáticos, sin embargo, a diferencia de lo que aseguran Gaur & Reed (1998), el contenido de H tiene una influencia negativa, pues se asocia con el contenido de agua y esta reduce el PCS.

### 8.1.6. Microanálisis de cenizas

Se rastreó la presencia de 29 elementos en la composición de ceniza de biomasa de la clase R y RPH, no obstante, sólo se detectó la presencia de 20 de ellos. En la Tabla 6, se concentran los valores dados en ppm. Los elementos formadores de cenizas se suelen encontrar como óxidos (Rodríguez *et al.*, 2021), sin embargo, en este estudio se determinaron las concentraciones en su forma elemental.

En el microanálisis de cenizas las concentraciones de elementos para la clase RPH fue mayor que para la clase R (ver Tabla 6), correspondiendo con un mayor porcentaje de cenizas determinado previamente para la clase RPH.

**Tabla 6**

*Microanálisis de cenizas de biomasa de las clases R y RPH.*

Elemento	Concentración en cenizas (ppm)		Elemento	Concentración en cenizas (ppm)	
	R	RPH		R	RPH
Ag	ND	ND	Mn	235.3	398.8
Al	272.8	1066.12	Mo	ND	ND
As	ND	ND	Na	236.7	594.0
B	61.6	156.8	Ni	1.2	5.6
Ba	100.5	387	P	5202.63	6640.97
Be	ND	ND	Pb	ND	ND
Ca	1666.68	4289.36	Sb	ND	ND
Cd	0.5	2.4	Se	ND	ND
Co	ND	ND	Si	ND	616.6
Cr	4.1	26.2	Sn	13.2	73.8
Cu	948.2	1911.68	Sr	137.7	330.7
Fe	1440.17	6061.43	Tl	ND	ND
K	5017.51	12874.41	V	0.5	2.4
Li	5.96	65.4	Zn	124.4	345.2
Mg	498.6	1289.31			

Nota. ND = No detectado

De los resultados de la Tabla 6, los elementos con concentraciones por arriba de las 100 ppm, presentadas orden descendente son: P>K>Ca>Fe>Cu>Mg>Al>Na>Mn>Sr>Zn>Ba para la clase R y K>P>Fe>Ca>Cu>Mg>Al>Si>Na>Mn>Ba>Zn>Sr>B para la clase RPH, de aquí se observa que el contenido de K y P son los dos elementos principales que se encuentran en cenizas de ambas clases de biomasa. Para el aguacate se han reportado las principales concentraciones de elementos en albura (Ca>K>Mg>Na>P), duramen (K>Ca>Mg>Na>P) y corteza (K>Ca>Mg>Na>P) (Martínez-Pérez *et al.*, 2015), en este caso los principales elementos son K (37 a 39 % en cenizas) y Ca (35 a 38 % en cenizas), a diferencia del presente estudio, por lo que, la parte específica del árbol analizada puede estar relacionada con dicha diferencia.

La concentración de K, Ca y P en cenizas también se ha reportado para residuos de otros frutales como ramas y hojas de árbol de limón, ramas de árbol de naranjo, donde, para la mayoría de los casos, la mayor concentración de elementos en orden descendente fue K (235,380 – 281,157 ppm), Ca (22,220 – 24,031 ppm) y P (5,811 – 29,480 ppm) (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). Para biomasa de poda de guayaba se ha reportado en orden de mayor a menor la concentración de K (12,874.41 ppm), P (6,640 ppm) y Ca (4,289.36 ppm) (Ruíz-

García *et al.*, 2022). De los valores anteriores, tenemos que existe una amplia variabilidad en la composición elemental que depende del tipo de biomasa analizada, dicha variabilidad también ha sido observada para diversos tipos de biomasa donde, al igual que en caso de biomasa procedente de árboles frutales, se encuentran predominantemente concentraciones más altas en Ca (132,583 – 279,785 ppm), K (37,339 – 116,436 ppm) y P (2,679 – 32,039 ppm), para madera y biomasa leñosa (Zajac *et al.*, 2018) concentraciones de K (37,535 – 385,963 ppm), Ca (18,373 – 29,166 ppm) y P (4,850 – 9,229 ppm) para aserrín de procesos de transformación primaria de la madera de diferentes industrias madereras (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020), y rangos de valores aún más amplios de Ca (36,409 – 353,721 ppm), K (19,936 – 193,663 ppm) y P (3,489 – 33,208 ppm) para biomasa de cultivos energéticos, residuos agrícolas, residuos forestales y residuos de la industria agroalimentaria (Zajac *et al.*, 2018). Comparado con lo reportado en la literatura, la concentración de P determinada en este estudio se encuentra dentro del rango de valores, sin embargo, para el caso de K y Ca sus concentraciones son bajas y solamente se encuentran cercanas a las correspondientes de poda de guayaba. Cuando existen concentraciones altas de Mg, Na, Ca y P, pueden producirse problemas como incrustaciones en los equipos de combustión, así como emisión de material particulado (Hartmann, 2019). En este estudio, las concentraciones de Ca para R (1666 ppm) y RPH (4289 ppm) se encuentran dentro del rango de los valores típicos para materiales leñosos vírgenes provenientes de poda según las especificaciones de la norma EN 17225-1 (2014) (3000 a 5000 ppm).

El elemento Si, no fue detectado para la clase R, sin embargo, para la clase RPH se encontró un valor de 616 ppm (Tabla 6). Varios autores informan que la biomasa con contenido alto en Si presentan un riesgo importante de formar escoria en los equipos de combustión, principalmente en presencia de concentraciones altas de K, además, pueden causar problemas de sinterización, corrosión de equipos y generación de material particulado, mientras que, concentraciones bajas de Ca implican un mayor riesgo de formación de escoria (Bryers, 1996; Zajac *et al.*, 2018; Hartmann, 2019; Rebbling *et al.*, 2020; Rodríguez *et al.*, 2021).

En cuanto a la presencia de metales pesados, se identificó cuantitativamente la presencia de cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), estaño (Sn) y zinc (Zn), teniendo las concentraciones más altas para Cu y Zn, superando las 100 ppm para ambas clases de biomasa (Tabla 6). El contenido de Cu en concentraciones más bajas, se ha reportado para distintos tipos de biomasa: ramas de naranjo (23.83 ppm), ramas de limón (72.77 ppm) (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020) poda de guayaba (113.7 ppm) (Ruíz-García *et al.*, 2022) y, aserrín y viruta de pino (58 a 416 ppm) (Morales-Máximo *et al.*, 2021). A partir de lo reportado en la literatura, tenemos que los valores de Cu dependen mucho del tipo de biomasa, y que, la variabilidad que se puede encontrar es amplia. De manera general, la presencia de metales pesados se asocia con la emisión de material particulado y con la formación de dioxinas y furanos, mediante reacciones catalíticas (Gavilán y Castro, 2007; Zhang *et al.*, 2016; Hartmann, 2019). Por lo anterior, es necesario considerar el contenido de metales pesados en la biomasa, pero también se debe considerar el tipo de tecnología empleada para determinar la posibilidad de uso (Alves *et al.*, 2019). En este caso, el contenido de cenizas de la clase RPH es uno de los parámetros que dejan ver una materia prima con propiedades no favorables para su utilización como biocombustible sólido, particularmente en cuanto al contenido de Zn, ya que su presencia en concentraciones altas, tal como reportan Marcotte *et al.* (2020), puede

conducir a un impacto significativo en la salud humana, lo cual ha sido demostrado por varios autores (Torvela *et al.*, 2014; Uski *et al.*, 2015; Dilger *et al.*, 2016).

La clase RPH de este estudio que comprende una fracción importante de hojas. Si tenemos en consideración que la característica principal de las herbáceas respecto a la madera es la carencia de tallo leñoso, podemos asumir que las propiedades químicas de herbáceas se asemejan más a la fracción RPH que a la fracción R. En este sentido, la biomasa herbácea como fuente de biocombustibles presenta un desafío importante en cuanto a su combustión, ya que se ha encontrado que la presencia típica de compuestos inorgánicos, en contraste con la biomasa leñosa es significativamente superior por lo que pueden esperarse mayor liberación de material particulado (MP) que se libera a la atmósfera durante la combustión, esto atribuido principalmente a elementos alcalinos como el K y Na a oligoelementos como Zn y Pb, así como a la presencia de S y Cl (Fagerström *et al.*, 2016; Höfer *et al.*, 2021).

Un mayor contenido de cenizas, como ya se ha mencionado, puede ser atribuido a la corteza, sin embargo, se sabe que la madera también cuenta con un alto potencial de bioabsorción de iones metálicos, como se ha encontrado para madera de abedul y abeto, con la presencia de algunos iones de metales pesados como el  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  y algunos otros iones como  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ , entre otros (Kampe & Magel, 2013; Su *et al.*, 2012).

#### 8.1.6.1. Contenido de cenizas en biomasa de aguacate: observaciones de campo

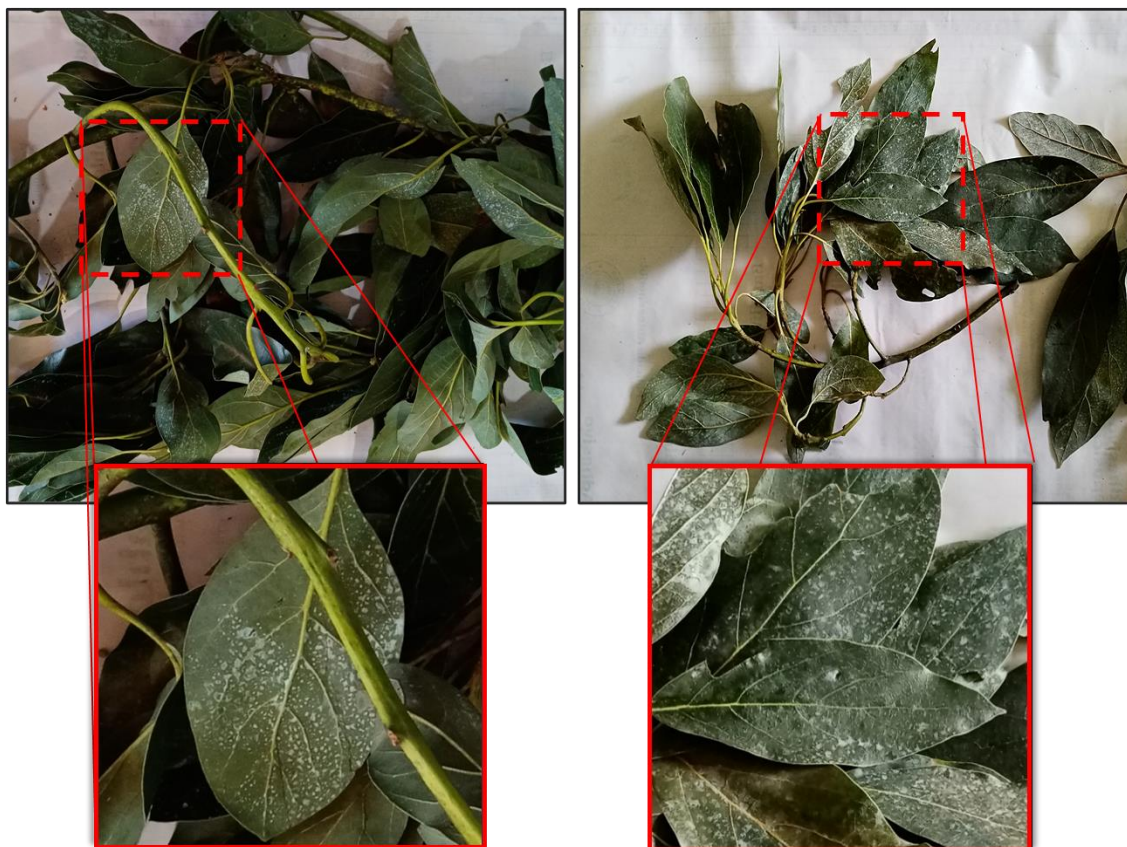
En el manejo de residuos de poda de aguacate, existen ciertas condiciones que pueden repercutir en la concentración de cenizas de la biomasa aumentando su proporción, esto, por el riesgo de contaminación debida al acarreo de suelo o arena del sitio de colecta, tal como se sugiere en la norma EN 17225-2 (2014) para este tipo de residuos. En el caso de las ramas, los contaminantes pueden depositarse en la corteza o en los poros de las fibras, donde, posiblemente la humedad desprendida de la madera después de la poda, pudiera coadyuvar a la adhesión de las partículas. Para el caso la clase RPH podría deberse mayormente por el transporte de contaminantes en la superficie foliar. Recientemente se ha encontrado que, en los suelos de algunos huertos de aguacate en Michoacán, concentraciones elevadas de Cu, Zn y B (Barajas, 2021). En la Figura 20, se muestran fotografías de uno de los sitios de muestreo que ilustran las condiciones en la que se disponen normalmente los residuos de poda (mismas condiciones encontradas durante el muestreo).



**Figura 20.** Disposición de residuos de poda en campo. En las imágenes se observa la disposición de la biomasa post-poda, condiciones normales que pueden propiciar la contaminación de la biomasa con suelo o arena.

La contaminación debida a las condiciones de manejo y procesamiento de la biomasa repercuten finalmente en la calidad de los pélets producidos. Jelonek *et al.* (2020) han demostrado recientemente que incluso los pélets comerciales suelen presentar una variedad de contaminantes que incluyen, corteza, vidrio, plástico, coque, escoria, materia mineral y metales, lo cual es descrito en el estudio que realizaron a 514 pélets comercializados en Polonia, Ucrania, Alemania y Estados Unidos, esto mediante un análisis petrográfico.

Otra observación durante el muestreo de la clase RPH, fue la presencia de manchones o salpicaduras en las hojas, presentando un color blanco-azulado, lo que presumiblemente sea alguno de los agroquímicos de utilizados en el manejo del cultivo (ver Figura 21).



**Figura 21.** Muestras de la clase RPH contaminadas con agroquímicos. Se muestra un zoom a algunas hojas, donde se aprecian manchas blanco-azuladas por posible contaminación con agroquímicos.

El manejo de este tipo de cultivo es intensivo en cuanto al uso de agroquímicos, sin embargo, resulta difícil determinar en primera instancia la posible influencia de los agroquímicos, y aún más difícil atribuir la participación específica de alguno de ellos que pudiera haber tenido interferencia en los resultados de este estudio dado que existe una gran variedad, muchos de ellos recomendados por la Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de México (APEAM) y que están aprobados para el uso en aguacate para exportación, a saber, 33 bioracionales (hormonas, enzimas, feromonas y agentes naturales), 94 fungicidas, 15 herbicidas y 128 insecticidas, además de la utilización fertilizantes para la nutrición del cultivo (<https://acortar.link/APEAM>).

Las concentraciones altas en Cu encontradas especialmente en la clase RPH, pueden estar relacionadas con el uso de pesticidas que forman parte del control fitosanitario del cultivo, en este sentido, Burgos *et al.* (2011) han reportado que los pesticidas usados en los huertos de aguacate del estado de Michoacán, suelen ser pesticidas sintéticos, principalmente utilizados por productores que mantienen un cultivo de tipo convencional, el cual es el tipo de manejo más extendido frente al manejo orgánico. Algunos de los fungicidas principalmente utilizados para el control fitosanitario contienen Cu y son de aplicación foliar (aplicación por aspersión): oxiclورو de cobre pH 85, hidróxido cúprico pH 77, SULFOCOP-F (mezcla de azufre + cobre), óxido cuproso GS 56, cuprasol pH 50, sulfato de cobre pH 93 y carbonato cúprico de amonio (García, 2013; García *et al.*, 2013; INTAGRI, 2017b). No obstante, para poder relacionar un contenido de Cu alto en biomasa de aguacate con el uso de plaguicidas, se requiere de estudios más específicos.

Otras causas posibles que pudieran explicar las concentraciones altas en Cu, pueden ser atribuidas a las condiciones ambientales del punto de muestreo, la temporada o las condiciones del cultivo tal como ha sugerido Zajac *et al.* (2018) en cuanto a la variabilidad del contenido de cenizas en residuos de biomasa procedentes de distintos cultivos.

Por otro lado, no se puede excluir la influencia de la fuente específica de donde se obtiene la biomasa, así como la naturaleza propia que le confiere su composición química. Por ejemplo, otra característica observada en la biomasa colectada, fue la presencia de floración en algunas de las ramas, lo cual influye en la composición final de la muestra (ver Figura 22). Cabe recordar que la muestra compuesta analizada en laboratorio, comprendió la integración biomasa perteneciente a 30 árboles (no en toda la biomasa se encontró flor). La poda de árboles en floración suele darse en podas de poca intensidad, sin embargo, esto ya depende del criterio del productor, del técnico o de las compañías que realizan las podas.



**Figura 22.** Flor de aguacate en muestras colectadas.

A partir de las características expuestas anteriormente, podrían explicarse hasta cierto punto, la composición química de cenizas en la biomasa analizada. La naturaleza distinta entre la biomasa foliar y la biomasa leñosa es el factor más importante al que se le puede atribuir las diferencias encontradas en este estudio. Es conocido, que los componentes principales que constituyen a la biomasa leñosa son hemicelulosa, celulosa, lignina, sustancias extraíbles y en menor medida, minerales. En el caso de las hojas de aguacate de distintas variedades, se

han encontrado hasta 64 compuestos diferentes en la fracción volátil de donde se han identificado alcanos, sesquiterpenoides, monoditerpenoides, aldehídos, aldehídos, fenil propanoides, entre otros (Rincón-Hernández *et al.*, 2011).

#### 8.1.7. Análisis químico básico

En la Tabla 7 se presentan los valores promedio obtenidos en porcentaje de celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles, dados en base seca y libre de cenizas. Los valores corresponden al análisis de las clases R y RPH. Se encontró una diferencia significativa para el contenido de celulosa, hemicelulosa y extraíbles.

**Tabla 7**

*Análisis químico básico de biomasa de la clase R y RPH. Contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles.*

Clase	Composición química básica (% en peso)			
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	*Extraíbles
R	46.75±1.11 <sup>a</sup>	20.62±0.21 <sup>a</sup>	14.45±0.87 <sup>a</sup>	16.97±0.45 <sup>a</sup>
RPH	37.55±0.53 <sup>b</sup>	18.37±0.37 <sup>b</sup>	13.62±0.01 <sup>a</sup>	23.24±0.15 <sup>b</sup>

Nota. Datos en base seca y libre de cenizas. Diferentes letras (a y b) denotan una diferencia estadísticamente significativa entre grupos, determinada a partir de la prueba t de Student ( $p < 0.05$ ).

\*Extraíbles = 100 – (celulosa + hemicelulosa + lignina + cenizas).

El contenido de celulosa determinado para la clase R (Tabla 7), se encuentra dentro de los valores típicos hallados en madera (40 – 50 %) (Klemm *et al.*, 1998; Rowell, 2005). También se encuentra dentro del rango de valores reportado recientemente para madera de poda de aguacate (38 – 45 %) (Paniagua *et al.*, 2021), la clase RPH se encuentra por debajo de ambos rangos de valores.

Los valores típicos de hemicelulosa en madera de latifoliadas suelen oscilar entre 24 – 40 % mientras que en coníferas el rango se encuentra entre 25 – 35 % (Bajpai, 2020), para madera de poda de aguacate se ha reportado un rango muy similar en contenido de hemicelulosa (28 – 37 %) (Paniagua *et al.*, 2021), sin embargo, en este estudio el porcentaje obtenido tanto para la clase R como para RPH se encuentra por debajo de dichos rangos (ver Tabla 7).

El contenido de lignina determinado en este estudio (Tabla 7), es inferior a los valores típicos reportados para la madera de coníferas (25 a 35 %) (Rowell, 2005) y de latifoliadas (18 a 25 %) (Dalimova & Abduazimov, 1994; Bajpai, 2020), pero muy cercano al rango mínimo de valores reportados para madera de poda de aguacate (15 – 27 %) (Paniagua *et al.*, 2021) y algunas fracciones más específicas del árbol de aguacate como ramas (20.96 %) y fuste (15.35 %) (Bernabé, 2011), sólo para el tocón de árbol de aguacate se ha reportado un contenido en lignina inferior al obtenido en este estudio (11.3 %) (Bernabé, 2011), este último resulta inferior al encontrado para la clase RPH en este estudio (13.62 %).

El contenido de extraíbles determinado para la clase R (Tabla 7), es superior al reportado en la literatura para árboles de aguacate: ramas (12.09 %) y fuste (11.07 %), aunque muy cercano al valor encontrado en tocón (19.17 %) (Bernabé, 2011). El contenido de extraíbles en la clase RPH, representa 1.3 veces el valor de la clase R. Más recientemente se han reportado los valores de contenido de extraíbles en madera de poda de aguacate de dos variedades

distintas (Hass y Bacon) y distinto tipo de fertilización (orgánica e inorgánica), dichos valores comprenden un rango de 2 al 10 % (Paniagua *et al.*, 2021), lo cual difiere ampliamente con los resultados obtenidos en el presente estudio para la clase R y aún mayormente para RPH, duplicando prácticamente el valor máximo de dicho rango (ver Tabla 7). En el estudio realizado por Bernabé (2011), se identificó en la presencia de ácidos grasos (ácido oleico y ácido palmítico) en los extractos obtenidos de fuste, tocón y ramas de árbol de aguacate.

De los estudios anteriormente referenciados en contraste con los resultados de este estudio se puede inferir que, la variedad de aguacate, el tipo de fertilización, así como la parte específica del árbol que sea analizada determinan la composición química de la biomasa. La composición química básica reportada para otros frutales también denota la variabilidad entre especies, por ejemplo, el rango de valores encontrado para madera de árbol de guayaba, manzana, mango: Celulosa (41.07 – 48.85 %), hemicelulosa (11.34 – 18.06 %) y lignina (12.24 – 23.48 %), para residuos de poda de árbol de manzana y guayaba: celulosa (32.66 – 37.55%), hemicelulosa (15.69 – 34.12 %) y lignina (13.88 – 19.54 %) (Camarena-Tello *et al.*, 2015; Carrillo-Parra *et al.*, 2021). En otro estudio se reporta el contenido de lignina (33.18 %) y extraíbles (13.72 %) para poda de manzana (Brand & Jacinto, 2020), en este último estudio, se determinó un contenido alto en lignina, que representa 2.3 veces mayor al valor de la biomasa de aguacate. De aquí, se puede identificar que la mayor variabilidad entre especies de frutales es respecto al contenido de hemicelulosa y lignina.

El contenido de extraíbles muchas veces ha sido desestimado y no se reportan debido al bajo contenido que suele encontrarse en la biomasa leñosa, sin embargo, algunos estudios informan que el contenido extraíble tiene un efecto en el PCS de la biomasa, de hecho, la presencia de extraíbles y lignina, tienen influencia en la elevación del PCS (Demirbas, 2002; Telmo & Lousada, 2011; Günther *et al.*, 2012). Otros autores también sugieren que un mayor PCS pueda deberse al contenido de extraíbles (Martínez-Pérez *et al.*, 2012; Velázquez- Martí *et al.*, 2017). Gruber *et al.* (2021) en un estudio reciente, compararon el poder calorífico de corteza de abedul con y sin extraíbles, encontrando que, la corteza sin la extracción tenía un mayor contenido energético, no obstante, se encontró que la mayoría de los extraíbles que contiene la corteza se pierden debido a procesos bióticos o abióticos durante su almacenamiento. El hecho de que el poder calorífico sea más alto en corteza que en la madera, se ha atribuido al contenido de taninos condensados que suelen encontrarse en la corteza (Zanetti *et al.*, 2021).

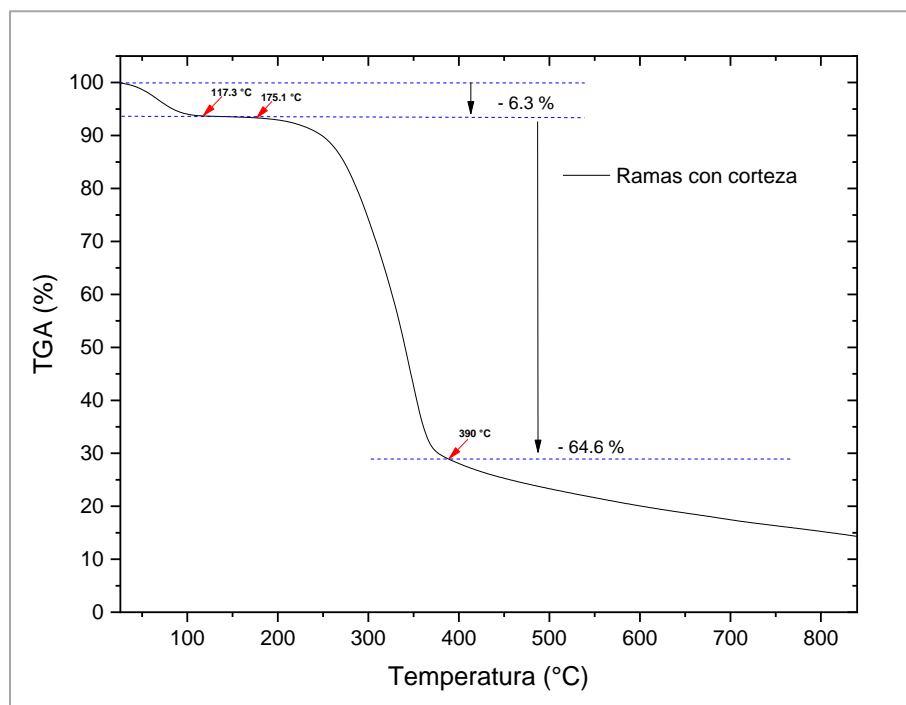
Tanto los extraíbles como la lignina, tienen un mayor PCS que la holocelulosa, cuyos valores típicos se encuentran entre 18 a 19 MJ/kg, valores inferiores a los rangos de valores de extraíbles (32 – 38 MJ/kg) y lignina (24 – 27 MJ/kg) (White, 1987; Rhén, 2004). Según Ortuño (1999), un valor estimado promedio del poder calorífico de la lignina en coníferas y latifoliadas es de alrededor de 6,300 Kcal/kg (26.37 MJ/kg aprox.) el cual es superior al de la celulosa y hemicelulosa cuyo valor para ambos casos es de alrededor de 4,100 Kcal/kg (17.16 MJ/kg aprox.). Herrera-Fernández *et al.* (2017), por su parte, reportan el poder calorífico para lignina y holocelulosa provenientes de duramen, albura y corteza de tres especies de encino (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*), los valores obtenidos se encuentran en los rangos 22.47 – 23.80 MJ/kg para la lignina y 14.22 – 16.34 MJ/kg para la holocelulosa. Las diferencias en poder calorífico entre los principales componentes de la biomasa, se puede explicar a partir del contenido de carbono total ya que este se relaciona positivamente con el poder calorífico, por ejemplo, al comparar el contenido de carbono total

en lignina frente a la celulosa encontramos que la lignina contiene un porcentaje de carbono significativamente mayor al de la celulosa (64 y 42 %, respectivamente), por lo tanto, un alto contenido de lignina, aunado a valores altos de extraíbles se pueden relacionar a su vez con la elevación del poder calorífico (Hartmann, 2019).

Durante la combustión de la biomasa lignocelulósica, los principales componentes orgánicos particulados que se producen son los derivados de monosacáridos de la descomposición de la celulosa, pero también algunos de ellos pueden provenir de la descomposición de compuestos alifáticos y oxigenados, terpenoides, resinas, gomas y otros biopolímeros, aunque en menores cantidades (Simoneit *et al.*, 1999). En la literatura disponible, no se encontró información específica sobre la combustión de sustancias extraíbles en madera que pudieran generar emisiones con posibles efectos en la salud humana, sin embargo, se sabe que, el humo de la leña, contribuye a una cantidad importante de sustancias orgánicas que son transportadas por el aire y que pudieran tener afectaciones a la salud humana, particularmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) (Vu *et al.*, 2012). La combustión eficiente de la biomasa puede ser favorecido a partir del densificado con lo que se puede generar una reducción en la emisión de material particulado (Werther *et al.*, 2000), además, tecnologías eficientes para uso residencial también pueden reducir emisiones (Hupa *et al.*, 2017; Quiñones-Reveles *et al.*, 2021), por otro lado, en el sector industrial las calderas con diseños optimizados reducen emisiones (Höfer *et al.*, 2019), además, suelen haber equipos de control de gases de combustión como medida secundaria (EN 17225-2, 2014).

#### 8.1.8. Análisis termogravimétrico (TGA)

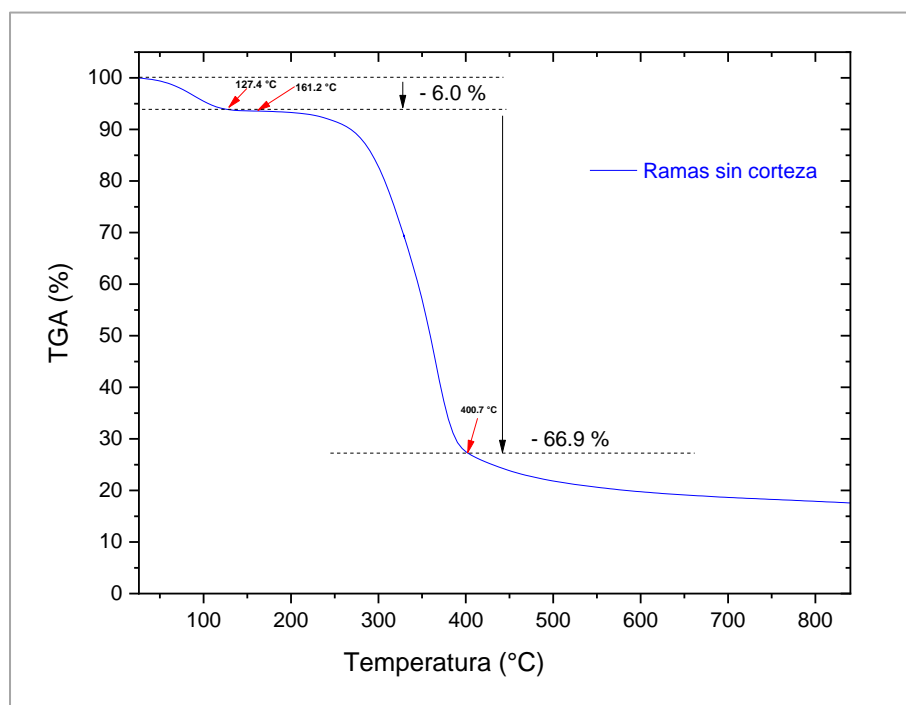
En la Gráfica 3, se muestra la pérdida de peso que experimentaron las ramas con corteza respecto a la temperatura.



**Gráfica 3.** Curva TGA de ramas con corteza. Pérdida de peso porcentual de la biomasa debido a la conversión térmica.

En la Gráfica 3 se observa que, inicialmente la pérdida de peso hasta cerca de los 117 °C fue de 6.3 %, dicha pérdida de peso se atribuye al contenido de humedad de la muestra. Se puede observar, que la mayor pérdida de peso se presentó en el rango de temperatura aproximada de 175 a 390 °C, con una pérdida del 64.6%. Finalmente, cercano a los 400°C en adelante, la descomposición térmica se llevó a cabo de manera menos importante hacia el final del proceso a 850°C, con una pérdida total de 17.8 % en peso.

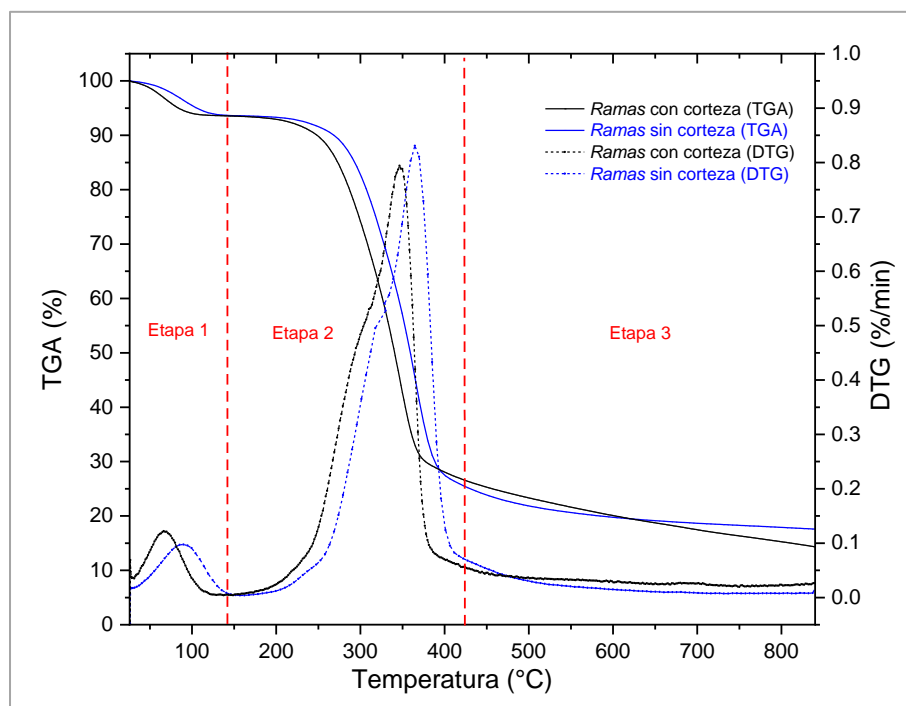
Es importante mencionar que, las curvas TGA y DTG de la biomasa lignocelulósica representan básicamente la descomposición térmica de sus componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, donde las diferencias encontradas se relacionan en cierta medida con las proporciones específicas de cada tipo de biomasa (González *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2006; Chen & Kuo, 2010). Según la literatura, la curva DTG para la madera representa tres picos superpuestos, relacionados primeramente con la volatilización de la hemicelulosa, que se superpone con el pico de mayor altura que corresponde a la celulosa y que en conjunto a su vez, se sitúan sobre un tercer pico de menor altura y más amplio, generado por la degradación de la lignina (Grønli *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2006).



**Gráfica 4.** Curva TGA de ramas sin corteza. Pérdida de peso porcentual de la biomasa debido a la conversión térmica.

A partir del análisis de las curvas TGA-DTG se identificaron tres etapas del proceso de conversión térmica, las cuales se indican en la Gráfica 5. La etapa 1 donde se presenta la eliminación de la humedad y se observa el pico más pequeño. En la etapa 2, se ubica el pico más alto que se encuentra en la región entre 280 a 420 °C donde, según la literatura se da la despolimerización de la hemicelulosa que, a pesar de la distinta composición de este constituyente según la fuente específica de biomasa, suele ocurrir desde los 150 a 350 °C (Kim *et al.*, 2006) siendo la el principal rango de conversión de 200 a 350 °C (Peng & Wu,

2010; Lv & Wu, 2012; Chen *et al.*, 2019). En esta segunda etapa normalmente se presenta la conversión de la celulosa en un rango entre 275 y 350°C (Kim *et al.*, 2006). En este sentido, se ha reportado que, para el rango de 300 a 350 °C generalmente se tiene la degradación de la celulosa de algunas maderas duras (Toscano *et al.*, 2015). En esta misma etapa se presenta también parte de la descomposición térmica de la lignina, donde se lleva a cabo la mayor desvolatilización (Brebú & Vasile, 2010; Kibet *et al.*, 2012). Se ha reportado que, generalmente la mayor tasa de descomposición de la lignina comprende el rango de 360 a 400 °C (Collard & Blin, 2014). En la etapa 3, se observó una descomposición más gradual a medida que aumenta la temperatura, la cual se atribuye a una degradación más lenta principalmente de la lignina donde según Kim *et al.* (2006), este rango puede comprender desde los 250 hasta los 500 °C, pero que puede extenderse hasta los 700°C (Toscano *et al.*, 2015).



**Gráfica 5.** Curvas TGA-DTG de ramas con y sin corteza y las tres etapas del proceso de conversión térmica identificadas.

De acuerdo a la Gráfica 5, para las dos fracciones estudiadas, se pueden observar perfiles DTG distintos tanto en la altura del pico principal como el desplazamiento horizontal observado. Dado que las condiciones del experimento fueron las mismas, las variaciones pueden ser atribuidas a la presencia/ausencia de corteza. En este sentido, Arteaga-Pérez *et al.* (2015), encontraron diferencias en los perfiles de DTG de la degradación másica de madera y corteza de Eucalipto en condiciones de pirólisis, aquí, los autores sugieren que la diferencia en las alturas del pico principal se puede atribuir a un contenido de cenizas más alto, aunado a la diferente composición entre la lignina de madera y la lignina de corteza. Cabe señalar que la diferencia en el contenido de cenizas encontrado entre ramas con corteza (1.22 %) y ramas sin corteza (0.89 %) fue del 0.33 %. En cuanto al desplazamiento horizontal hacia la izquierda de las ramas con corteza, se puede atribuir a un mayor contenido de extraíbles, particularmente taninos tal como se sugiere en la literatura (Burhenne *et al.*, 2013), o bien,

como se ha reportado para el caso de *Pinus pinaster*, la corteza es una especie más reactiva y por tanto, al descomponerse a una menor temperatura que la madera puede producir este tipo de desplazamientos, esto atribuido a un menor contenido de lignina (Órfão & Figueiredo, 2001).

En la gráfica DTG se pueden observar unos pequeños hombros en el pico principal a una temperatura aproximada de 300 a 330°C. Se ha encontrado que, para distintos tipos de biomasa lignocelulósica, esta pequeña deformación en el pico principal dada por la superposición parcial de dos picos, está asociada a la degradación de la hemicelulosa (Grønli *et al.*, 2002; Peng & Wu, 2010; Lv & Wu, 2012; Díez *et al.*, 2020).

Pérez *et al.* (2018), realizaron un análisis cinético de pirólisis de poda de olivo, donde, se encontró que la holocelulosa, se descompuso térmicamente en un rango de temperatura de 500 K (227 °C) a 673 K (400 °C), muy similar a lo identificado para las ramas de aguacate. Identificaron un pico representativo a los 534 K (261 °C) atribuido a la hemicelulosa y otro a 598 K (325 °C) atribuido principalmente a la celulosa. A partir de los 673 K (400 °C) se dio una pérdida másica más gradual, extendiéndose hasta los 973 K (700 °C).

El aprovechamiento energético de los pélets, si bien suelen destinarse para aplicaciones térmicas o para la generación de energía eléctrica a partir de su combustión directa, también pueden ser utilizados para la generación de gas pobre mediante un proceso de gasificación, donde, dicho gas puede quemarse de forma directa o puede purificarse para sintetizar combustible para el transporte (Pradhan *et al.*, 2018).

## 8.2. Proceso de peletizado

En el proceso de molienda de la biomasa se obtuvo la distribución del tamaño de partícula presentada en la Tabla 8. La biomasa muestreada para granulometría fue la misma que se utilizó para el peletizado.

**Tabla 8**

*Distribución de tamaño de partícula de madera de aguacate obtenido después del proceso de molienda.*

Tamiz/Malla (mm)	Fracción retenida (mm)	Media de la distribución (%)	Desviación estándar
3.15	> 3.15	7.49	1.27
2.80	2.80 a 3.15	7.00	0.63
2.00	2.00 a 2.80	15.52	1.45
1.40	1.40 a 2.00	17.50	1.28
1.00	1.00 a 1.40	14.94	0.26
0.50	0.50 a 1.00	23.07	1.61
0.25	0.25 a 0.50	10.50	2.01
Finos	< 0.25	3.98	1.01

Nota. Se realizó un número de 5 ensayos (n=5).

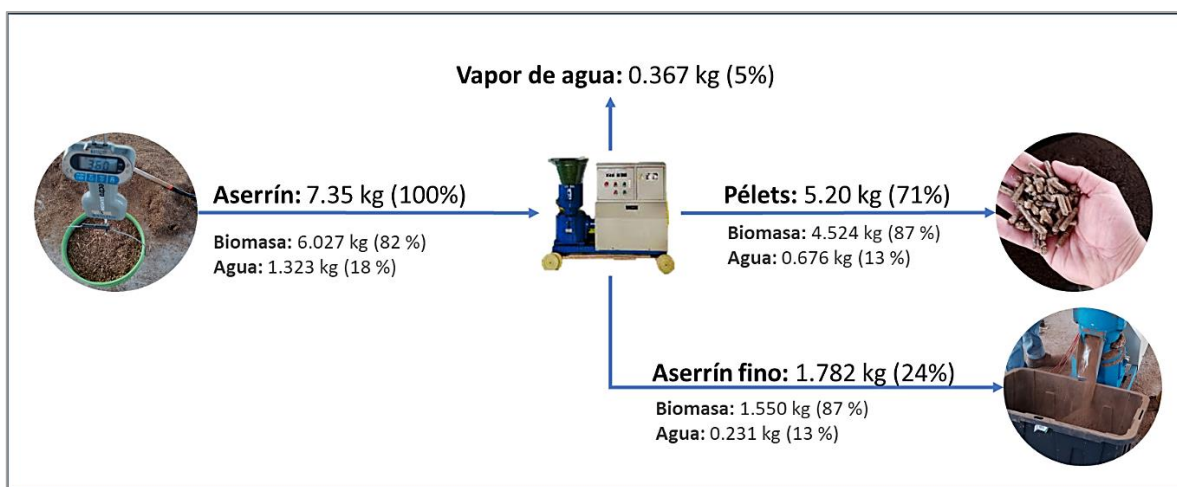
Según los resultados obtenidos, la fracción que representa el mayor porcentaje es la de 0.50 mm (23 %), seguida de la fracción 1.40 mm (17.50 %) y con menor proporción se identificó a la fracción de finos (3.98 %) (Tabla 8). Dentro de la distribución de tamaño de partícula recomendada para obtener pélets de alta calidad, se considera como la proporción más alta a la fracción de 0.5 a 1 mm (alrededor del 30%) y como proporción más baja a la fracción > 3

mm (hasta un 1%), además, se sugiere un valor no menor al 20 % de la fracción < 0.25 mm (finos) (ver Tabla 2 de la sección 5.6.3.) (Kaliyan & Morey, 2009). La distribución encontrada en este estudio, concuerda en cuanto a la fracción con mayor proporción (0.5 mm), sin embargo, las demás fracciones distan mayormente de la distribución recomendada. Por otro lado, se ha reportado la distribución de tamaño de partícula para biomasa residual proveniente de coníferas, latifoliadas y aserrín proveniente de industrias madereras, así como algunos residuos de cítricos (ramas, hojas y cáscara), donde las dos mayores proporciones fueron para las fracciones de 1.0 mm (33.10 %) y 0.5 mm (19.65 %) y la menor proporción fue para la fracción 3.15 mm (3.64 %) (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). Como se puede observar, sólo para la fracción 0.5 mm existe coincidencia en cuanto a las fracciones más representativas para ambos estudios.

En un estudio realizado por Ramezanzade & Moghaddam (2018) sobre la optimización de parámetros de producción de pélets de poda de árbol de pistacho, encontraron una influencia del tamaño de partícula en la durabilidad mecánica y la densidad de pélets. Por otro lado, es importante tener en cuenta que, el tamaño de partícula resultante del proceso de astillado y molienda depende de las características del equipo utilizado para su procesamiento, del tipo de biomasa y las condiciones de trabajo del material como el contenido de humedad y la temperatura de peletizado (Kocsis & Csanády, 2019), por lo que no resulta extraño encontrar variabilidad entre las distintas fuentes de biomasa.

### 8.2.1. Balance de materia en el proceso de peletizado

En la Figura 23 se muestra un esquema representativo del balance de materia del proceso de peletizado realizado experimentalmente. Como ya fue descrito en la metodología, el contenido de humedad registrado para la prueba realizada en el balance de materia no es el mismo valor que el contenido de humedad de alimentación en los pélets finales (15 %).



**Figura 23.** Balance de materia del proceso de peletizado.

El flujo másico del proceso considerando 15 minutos de operación del equipo y una alimentación de 7.35 kg, corresponde a 29.4 kg/h, a su vez, una eficiencia del 71 % (ver Figura 22), representa un valor 20.8 kg/h de pélets formados. La capacidad de procesamiento reportada por el fabricante del equipo es de 80 a 120 kg/h, lo que resulta muy superior a lo

procesado experimentalmente. Los factores a los que se le puede atribuir la baja eficiencia en el proceso, es el contenido de humedad que impedía la correcta formación de los pélets, lo cual generó tiempos muertos.

La temperatura de la matriz de extrusión se determinó entre 91 y 98 °C, sin embargo, la medición se registró aproximadamente un minuto después de apagar el equipo (por seguridad) por lo que la temperatura real del proceso pudiera superar los 100 °C. Según la literatura, la alta temperatura promueve la deformación plástica de partículas termoplásticas de la biomasa, lo cual promueve la formación de enlaces y que, finalmente mejora la durabilidad del pélet. Además, la temperatura alta garantiza la gelatinización de almidones que también favorece a la durabilidad gracias a su efecto aglutinante (Abdoli *et al.*, 2018)

La temperatura de salida de los pélets fue de 75 – 80 °C. Se ha reportado que la temperatura de salida de los pélets suele ser de alrededor de 70 °C y humedad de 12 a 18 %, para alcanzar finalmente una humedad a temperatura ambiente de entre 8 a 12 % (Abdoli *et al.*, 2018). Sin embargo, es importante tener en cuenta que las condiciones específicas de proceso, por ejemplo, la humedad inicial, parámetros de proceso como la temperatura de la matriz de extrusión y el tipo de biomasa, principalmente, pueden modificar la temperatura y humedad finales.

### 8.2.2. Cálculo del consumo de energía

El consumo de energía calculado para el proceso de molienda se presenta en la Tabla 9, donde se muestra el valor del consumo teórico según las características de diseño del equipo y, por otro lado, el consumo real calculado a partir de la potencia equivalente y el tiempo de funcionamiento real.

**Tabla 9**

*Consumo de energía del proceso de molienda.*

Potencia equivalente (KW)	Consumo teórico		Potencia equivalente (KW)	Consumo real	
	Tiempo neto de funcionamiento (h)	Consumo específico (kWh)		Tiempo neto de funcionamiento (h)	Consumo específico (kWh)
7.5	0.25	5	7.5	0.66	10

Los valores reportados en la Tabla 9, sobre el consumo real, contempla sólo el consumo estimado por tiempo de uso, pero no considera el consumo total de energía generado durante todo el procesamiento de la biomasa. La diferencia estimada entre el consumo teórico y el consumo real, es de 5 kWh, lo que se atribuye al número de ocasiones que tuvo que apagarse y encenderse el equipo por desperfectos, además, de los tiempos muertos.

Para el consumo de energía del equipo de peletizado, no se pudo realizar la medición del consumo mediante el registro del medidor de la red CFE como en el caso del equipo de molienda, por lo que sólo es reportado el consumo teórico calculado a partir de la potencia equivalente indicada por el fabricante y el tiempo neto de funcionamiento (Tabla 10).

**Tabla 10***Consumo de energía del equipo de peletizado.*

<b>Consumo teórico calculado por hora de trabajo</b>		
Potencia equivalente (KW)	Tiempo neto de funcionamiento (h)	Consumo específico (kWh)
7.5	0.25	1.875

Se estimó el consumo de electricidad por tonelada de pélets, considerando exclusivamente la etapa de peletizado, esto a partir de consumo específico teórico y, conociendo la cantidad de pélets producidos por hora (20.8 kg/h), resultando en un valor de 90.14 KWh/ton. En la literatura se ha reportado el consumo energético para el proceso de peletizado en un equipo de pequeña escala (potencia nominal de 11 KW) en dos fuentes distintas de biomasa de madera, encontrando valores distintos de consumo energético por tonelada de pélets producidos de 74.74 y 86.02 KWh/ton, donde, la variación se atribuye a la distinta naturaleza de la biomasa procesada (González-Hassig y Talero-Rojas, 2014). Los valores referenciados son inferiores a los aquí calculados, sin embargo, se puede observar que existe una importante diferencia en cuanto a consumo energético debido a la fuente específica de la biomasa, según la literatura, el tipo de biomasa, la dureza y la densidad inicial, el tamaño de partícula, así como el contenido de humedad, pueden influir en el consumo energético del proceso de peletizado (Tumuluru, 2015; Abdoli *et al.*, 2018; Kocsis & Csanády, 2019).

Algunos equipos comerciales para peletizado de biomasa tienen capacidades de entre 200 kg/h hasta valores que pueden llegar a las 8 ton/h y con valores de consumo de energía de 15 hasta cerca de los 40 kWh/ton (Tumuluru *et al.*, 2010).

El proceso general de densificación de la biomasa implica varias operaciones unitarias con consumos energéticos específicos, por ejemplo, Tumuluru (2015) ha reportado el consumo energético para el proceso de peletizado de madera de pino, donde indica que el consumo correspondiente a la etapa de peletización representa el 9.3 % (43 KWh/ton) del total de energía consumida, mientras que las etapas de astillado y molienda comprenden el 26.11 % (137 KWh/ton) y el secado (en secador rotatorio) comprende el mayor porcentaje con un 65 % (340 KWh/ton), siendo esta etapa la más crítica en cuanto a inversión de energía.

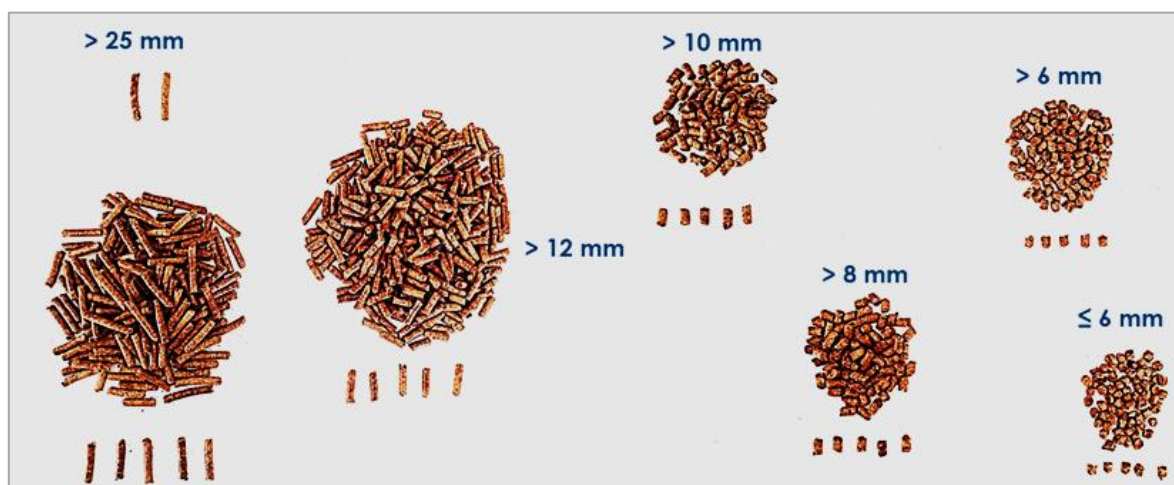
En este estudio no se dio seguimiento al balance de materia y energía general que comprende las distintas operaciones unitarias implicadas en la producción de pélets, que parten del acondicionamiento de biomasa, hasta la obtención del material densificado. Para ello se requiere un estudio más detallado considerando las características técnicas de los equipos y las condiciones de operación del proceso en general para poder tener resultados más aproximados a la realidad y que, sean de utilidad para el posible diseño de una planta piloto.

### 8.3. Caracterización de pélets

Para la fécula de maíz empleada como aditivo en la elaboración de P-CF se determinó el contenido de cenizas, el cual fue de 0.51 % con una desviación estándar de 0.03 %. El contenido de cenizas reportado en la literatura para la fécula de maíz oscila entre 0.09 a 0.52 %, incluyendo fécula comercial (Abdel-Aal, 1997; Hernández-Lauzardo *et al.*, 2004; Tovar, 2008).

### 8.3.1. Análisis de dimensiones de pélets

En la Figura 24 se muestra la distribución de longitudes de una muestra (500 g) de pélets obtenidos. Enseguida se muestra los valores en peso de cada clase de longitud (Tabla 11).



**Figura 24.** Distribución de longitudes de pélets del ensayo.

**Tabla 11**

*Distribución de longitudes de los pélets por clase.*

Clase de longitud de pélet	Peso de la fracción resultante por clase (g)	
	P-CF	P-SF
≤ 6 mm	14.42 (3 %)	24.67 (5 %)
> 6 mm	18.90 (4 %)	22.56 (4 %)
> 8 mm	20.76 (4 %)	24.84 (5 %)
> 10 mm	23.83 (5 %)	24.53 (5 %)
> 12 mm	256.18 (52 %)	216.62 (44%)
> 25 mm	157.78 (32 %)	181.77 (37 %)

Nota. Los resultados corresponden a la distribución de longitudes para una muestra de 500 g. Entre paréntesis se indica el porcentaje correspondiente del total de la muestra.

De los resultados de la Tabla 11 se pudo determinar que, para P-CF y P-SF la mayor porción de los pélets se encontró en los rangos > 12 mm y > 25 mm, sumando porcentajes de 84 y 81 %, respectivamente. En P-CF se encontró un porcentaje mayor de longitud >25 mm respecto a P-SF.

La longitud promedio de los pélets obtenidos fue de 15.69 mm con una desviación estándar de 8.91 mm. En la literatura se han reportado valores que van desde 10.47 mm hasta los 47.73 mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2018; García *et al.*, 2019; Acampora *et al.*, 2021; Kougioumtzis *et al.*, 2021; Carrillo-Parra *et al.*, 2021), sin embargo, según la norma En 17225-2 (2014) el rango de valores de pélets debe ser  $3.15 < L < 40$  mm y de  $3.15 < L < 45$  mm, según el manual de certificación ENplus, donde el máximo de pélets con longitud > 40 mm debe ser ≤ 1%. Como se puede apreciar, la longitud promedio de los pélets puede tener una

distribución amplia, lo cual dependerá del tipo de biomasa, pero también, se ha identificado que el contenido de humedad es un factor que influye directamente en la longitud de los pélets (García *et al.*, 2019).

En la Tabla 12 se presenta la media del diámetro para cada tipo de pélet y su desviación estándar.

**Tabla 12**

*Análisis de dimensiones de los pélets obtenidos. Media del diámetro de los pélets obtenidos  $\pm$  desviación estándar.*

Clase de pélet	Diámetro (mm)
P-CF	6.08 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>
P-SF	6.09 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>

Nota. (n=10). Las letras denotan que no hay diferencia significativa entre clases (prueba t para grupos independientes, p<0.05).

El diámetro promedio en los pélets obtenidos fue de 6.09 mm con una desviación estándar de 0.03 mm, según la norma EN 17225-1 (2014) se clasifican a los pélets como D06, cuando tienen diámetros de 6 $\pm$ 1 mm. El diámetro de pélets está definido por el tamaño de los orificios de la matriz de extrusión utilizada en el peletizado (Tumuluru, 2020; Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Dependiendo el tipo de biomasa utilizada, los pélets pueden tener ligeras variaciones en el diámetro final, por ejemplo, Carrillo-Parra *et al.* (2021) reportaron la calidad de 17 tipos de biomasa de distintas fuentes agrícolas y forestales, donde, el rango de diámetros osciló entre 5.80 – 6.14 mm.

### 8.3.2. Determinación de humedad

En la Tabla 13 se presentan los valores de humedad final obtenidos para P-CF y P-SF.

**Tabla 13**

*Contenido de humedad final de los pélets obtenidos. Media del contenido de humedad  $\pm$  desviación estándar.*

Clase de pélet	Contenido de humedad (%)
P-CF	8.31 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>
P-SF	8.85 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>

Nota. (n=3). Las letras distintas (a y b) denotan una diferencia estadísticamente significativa entre clases (prueba t, p<0.05).

El contenido de humedad determinado para ambos pélets presentó una diferencia significativa (p<0.05). Teniendo en cuenta que las condiciones de peletizado fueron las mismas, se puede inferir un posible efecto de la fécula de maíz sobre este parámetro. En la literatura se ha reportado que, los aditivos de almidón de distintas fuentes, suelen usarse en la producción de pélets ya que reducen el contenido de humedad final, lo que es favorable para la combustión, no obstante, un elevado contenido en almidón puede producir pélets demasiado secos, lo cual puede afectar la durabilidad mecánica (Tarasov *et al.*, 2013).

El contenido de humedad en pélets reportados en la literatura recientemente para distintas fuentes de biomasa comprende un rango de valores entre 4.56 y 8.68 % (Gürdil *et al.*, 2019; Kocer & Kurklu, 2020; Carrillo-Parra *et al.*, 2021; Acampora *et al.*, 2021; Kougioumtzis *et al.*, 2021 Ruiz-García *et al.*, 2022). Dicho rango está por debajo de los aquí obtenidos, sin

embargo, en todos los casos se encuentran por debajo del 10%, lo cual es favorable para su aprovechamiento energético mediante combustión (EN 17225-2, 2014).

### 8.3.3. Determinación de densidad

La densidad de partícula, así como la densidad a granel de pélets se presentan en la Tabla 14. Para ambas clases de pélets los valores son muy cercanos entre sí, con diferencia estadística significativa sólo para la densidad a granel. Como referencia, se sabe que el rango de valores de densidad seca al aire (humedad del 12 a 15 %) reportado en la literatura para fuste y ramas de aguacate con diámetros superiores a 20 cm se encuentra entre 0.45 a 0.63 g/cm<sup>3</sup> (Silva-Guzmán *et al.*, 1999; Silva-Guzmán, 2008; Fuentes-Talavera *et al.*, 2011) y densidad básica de 0.48 a 0.52 g/cm<sup>3</sup> para ramas de diámetros inferiores a 20 cm (Soria-González, 2019). En el presente estudio, se determinó el promedio de la densidad de partícula de P-CF y P-SF en 1.186 g/cm<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0.016 g/cm<sup>3</sup>, entonces, se puede decir que la biomasa tras el proceso de densificado, duplica su densidad original.

**Tabla 14**

*Densidad de partícula, densidad a granel y densidad energética de los pélets obtenidos.*

Clase	Densidad de partícula (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad a granel (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad energética (MWh/m <sup>3</sup> )
P-CF	1.186±0.014 <sup>a</sup>	585.45±1.93 <sup>a</sup>	2.94
P-SF	1.187±0.019 <sup>a</sup>	580.97±4.14 <sup>a</sup>	2.92

Nota. Los valores se presentan a humedad final de pélets (media ± su desviación estándar). La densidad energética se calculó a partir la media de la densidad a granel y la media del poder calorífico inferior (a presión constante). La letra “a” denota que se encontró diferencia significativa (prueba t, p<0.05) para densidad energética (n=10) y densidad a granel (n=3).

La densidad de partícula promedio para los dos grupos de pélets ensayados (1.186 g/cm<sup>3</sup>), se encuentra ligeramente por debajo del rango reportado para poda de árbol de naranja a diferentes tamaños de partícula (1.22 – 1.30 g/cm<sup>3</sup>) (Gürdil *et al.*, 2019), por arriba de lo reportado para poda de manzana (1.06 g/m<sup>3</sup>) (Brand & Jacinto, 2020) y poda de guayaba (1.05 g/m<sup>3</sup>) (Ruíz-García *et al.*, 2022) pero dentro del rango de valores de distintas fuentes forestales y agrícolas (1.02 – 1.37 g/m<sup>3</sup>) (Kocer & Kurklu, 2020; Carrillo-Parra *et al.*, 2021). La densidad de partícula de los pélets es importante ya que, los vacíos que se producen dentro de los pélets dependiendo del nivel de su compactación, controlan el movimiento de oxígeno, lo cual finalmente influye en el comportamiento de la combustión y el tiempo de quemado (Mediavilla *et al.*, 2012).

En cuanto a la densidad a granel, no se encontró diferencia significativa entre P-CF y P-SF. Por otro lado, los valores obtenidos son inferiores al rango determinado para pélets de poda de olivo, granada y guayaba (603.50 – 749.40 kg/m<sup>3</sup>) (Kocer & Kurklu, 2020; Kougioumtzis *et al.*, 2021; Ruíz-García *et al.*, 2022), pero superiores a los obtenidos por Gürdil *et al.* (2019), para poda de naranjo a diferentes tamaños de partícula (530 – 542 kg/m<sup>3</sup>) y para poda de manzana incluso a distintas proporciones de mezcla con madera de pino (506 – 558 kg/m<sup>3</sup>) (Brand & Jacinto, 2020). La densidad a granel para ambos grupos también se encuentra fuera del rango, aunque muy cercanos al valor mínimo de calidad de la norma EN 17225-2 (2014) (600 ≤ DG ≤ 750 kg/m<sup>3</sup>). En la literatura se ha identificado al contenido de humedad como uno de los parámetros más importantes que determinan una mayor densidad a granel, (Samuelsson *et al.*, 2009; Carone *et al.*, 2011), además del contenido de humedad, también

se ha relacionado la temperatura y velocidad del troquel de a la que se lleva a cabo el peletizado (Tumuluru, 2020).

La densidad energética de los pélets es en promedio 2.93 MWh/m<sup>3</sup>. El valor de densidad energética representa la cantidad de energía que se puede obtener en unidades de MWh, en la combustión a presión constante de 1 m<sup>3</sup> de pélets a las condiciones de humedad a la que se encuentra el pélet. En la literatura se han reportado algunos valores de densidad energética por cálculo directo multiplicando el PCS y la densidad a granel. La densidad energética promedio obtenida para los pélets de aguacate por cálculo directo es de 11.43 GJ/m<sup>3</sup>, el cual se encuentra dentro del rango de valores reportado para pélets de madera de pino (8.5 – 15.69 GJ/m<sup>3</sup>) (Peng *et al.*, 2015; García *et al.*, 2019). Frente a la densidad energética de algunos pélets comerciales (12 – 12.5 GJ/m<sup>3</sup>), los pélets de aguacate se encuentran levemente por debajo Peng *et al.*, 2015).

#### 8.3.4. Determinación de la durabilidad mecánica

La durabilidad mecánica, el índice de resistencia al impacto de los pélets obtenidos se determinó para P-CF y P-SF. En la Tabla 15 se muestran los resultados.

**Tabla 15**

*Durabilidad mecánica e índice de resistencia al impacto (IRI).*

Clase	Durabilidad mecánica (%)	IRI
P-CF	95.21±0.91 <sup>a</sup>	240±97.69 <sup>a</sup>
P-SF	86.68±0.19 <sup>b</sup>	186.67±27.36 <sup>b</sup>

Nota. Diferentes letras denotan una diferencia estadísticamente significativa (prueba t, p<0.05) para durabilidad mecánica (n=3) e IRI (n=20).

Para la durabilidad mecánica se encontró una diferencia significativa (p<0.05) entre los dos tipos de pélets, teniendo un 8.5 % de diferencia entre la durabilidad mecánica de P-CF y P-SF lo que también se ve reflejado en el IRI con una diferencia de 53 unidades (22 %).

La diferencia encontrada entre la durabilidad mecánica de P-CF y P-SF (Tabla 15), nos indica la influencia positiva de la adición de fécula de maíz para este parámetro. El efecto de la fécula de maíz en la durabilidad mecánica de pélets ya ha sido probado en otros estudios, por ejemplo, se ha reportado el efecto de la fécula en biocarbón obtenido de la cáscara de almendra de palma, donde la adición del 10 % de fécula a un contenido de humedad del 20%, se obtuvieron briquetas con una dureza (resistencia a la tracción por triturado) superior a 100 veces frente al biocarbón sin fécula (Bazargan *et al.*, 2014).

En la literatura se han determinado valores de durabilidad para pélets de poda de olivo y granada (87.2 – 98.4 %) (Gürdil *et al.*, 2019; Kocer & Kurklu, 2020; Kougioumtzis *et al.*, 2021, Acampora *et al.*, 2021), valores que son superiores a los obtenidos en este estudio. de Souza *et al.* (2021) sugieren que una mayor durabilidad mecánica y la reducción del agrietamiento en los pélets puede deberse al contenido de lignina. En este sentido, el porcentaje bajo en lignina encontrado en la biomasa de aguacate (Tabla 7), es lo que pudo influir mayormente en la baja durabilidad mecánica de los pélets, que se puede identificar particularmente en los pélets sin aditivo (P-SF). Ramezanzade & Moghaddan (2018),

quienes realizaron la optimización de los parámetros de producción de pélets provenientes de poda de árboles de pistacho encontraron que al aumentar el contenido de humedad de 12 a 16 % hubo una disminución tanto en la densidad como en la durabilidad de los pélets, con un aumento en la temperatura del equipo peletizador de 75 a 100 °C también se observó un aumento en ambos parámetros, pero al aumentar el tamaño de partícula de la biomasa de 1 a 3 mm, disminuyeron. Según los autores, los valores óptimos de peletizado para esta biomasa fueron: 11.7 % de humedad, temperatura de 100 °C y 1.65 mm de tamaño de partícula. En el presente estudio, el contenido de humedad fue de 15 % y la temperatura de la matriz de extrusión fue de entre 91 a 98 °C. Algunos estudios recientes también indican que el contenido de humedad es uno de los parámetros que tienen mayor influencia en la durabilidad mecánica, se ha observado, además, que dicho parámetro se ve influido por el contenido de extraíbles, pero también por el contenido de hemicelulosas y más específicamente el contenido de manano, xilano de galactosa (Larsson *et al.*, 2021; Lavergne *et al.*, 2021).

Cabe recordar que las condiciones de trabajo a nivel laboratorio son distintas a las condiciones reales aquí experimentadas, donde se tiene un menor control de los parámetros como la presión de extrusión y la temperatura, por lo tanto, las condiciones del material como el contenido de humedad y el tamaño de partícula son las que definen mayormente la calidad de los pélets obtenidos.

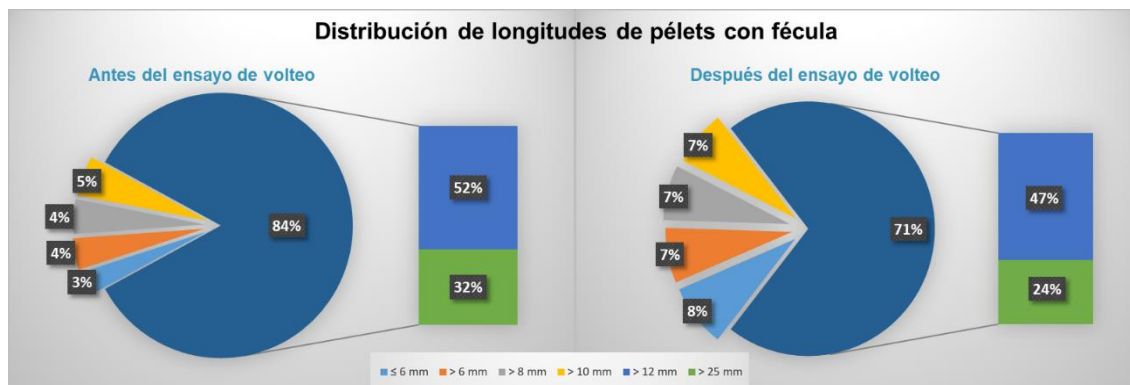
En cuanto al índice de resistencia al impacto (IRI), Carrillo-Parra *et al.* (2018), reportaron un rango IRI (117 – 170) para pélets de madera de tres arboles tropicales (*Acacia wrightii*, *Ebenopsis ebano* y *Havardia pallens*), valores inferiores a los aquí obtenidos, por lo que se puede asegurar una mayor integridad de estos pélets al ser sometidos a una caída de altura 1.8 m y que simulan la manipulación a la que son sometidos los pélets durante la producción, empaque, transporte, etc.

La distribución de las longitudes de pélets dado en porcentajes se presenta en Gráfica 6 y Gráfica 7, para P-CF y P-SF, respectivamente. Aquí se presenta la distribución de longitudes antes y después del ensayo de durabilidad mecánica por el método de volteo.

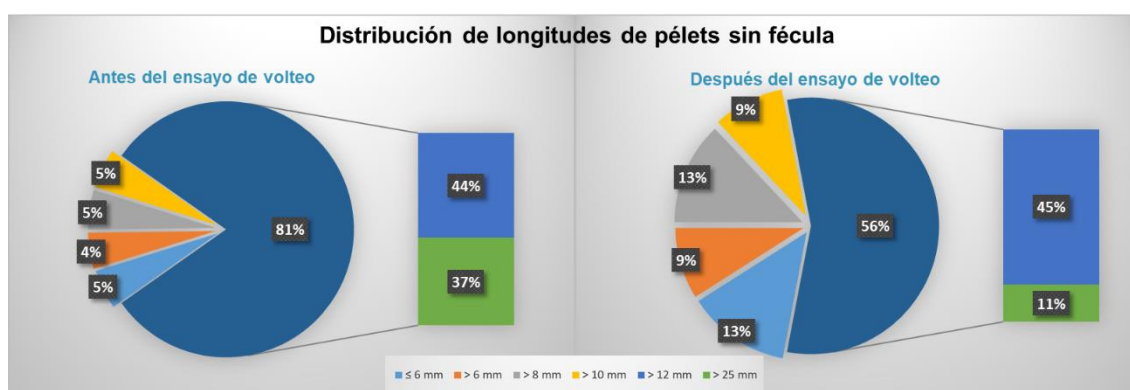
El promedio general y la desviación estándar de la distribución de longitudes de pélets es de  $16.7 \pm 8.4$  mm para P-CF y de  $15.6 \pm 8.9$  mm para P-SF.

En los ensayos realizados para P-CF y P-SF se encontró que los valores están dentro del rango de  $3.15 < L < 40$  mm de la norma EN 17225-2 (2014). Por otro lado, la norma establece como máximo un 1% de pélets con longitud  $> 40$  mm, lo cual también se cumple ya que para ambos grupos fue inferior al 1%.

Como se puede observar en la Gráfica 6, los P-CF con  $> 12$  mm representan el 84 % previo al ensayo de volteo, sin embargo, después de dicho ensayo este mismo grupo sólo representa el 71 % del total (una diferencia del 13 %), por lo que hubo una reducción de tamaño debido al esfuerzo mecánico al que fueron sometidos. De manera similar la distribución de tamaño en P-SF para el grupo  $> 12$  mm (ver Gráfica 7), se ve reducido el porcentaje antes y después del ensayo de volteo, no obstante, la diferencia en este caso fue del 25 %, los que es prácticamente el doble de diferencia para P-CF.



**Gráfica 6.** Distribución de longitudes de pélets con fécula de maíz (P-CF), dada en porcentajes.



**Gráfica 7.** Distribución de longitudes de pélets con fécula de maíz (P-SF), dada en porcentaje.

#### 8.4. Evaluación de la calidad de pélets

En la Tabla 16 se comparan los valores obtenidos de los pélets de aguacate con los requerimientos de la certificación *ENplus* para uso residencial y comercial, así como los fijados por la norma EN 17225-2 (2014) para uso industrial y sus distintas clasificaciones.

La durabilidad mecánica es uno de los parámetros que se encontraron fuera del rango de valores deseables. La importancia de la durabilidad mecánica radica en la mayor integridad de los pélets en la manipulación, transporte y almacenamiento, ya que, una baja durabilidad conduce a la generación de finos que cambian la densidad aparente de los pélets pero que además, pueden ser peligrosos para la salud cuando estos son inhalados o incluso al tener contacto con la piel, también pueden representar riesgo de seguridad por el potencial autocalentamiento, riesgo de incendios y explosiones, adicionalmente, aumentan las pérdidas de material durante el transporte y almacenamiento y, pueden generar problemas en la alimentación de calderas (Temmerman *et al.*, 2006; Obernberger & Thek, 2010; Mostafa *et al.*, 2019; Kuranc *et al.*, 2020). La baja durabilidad también puede aumentar el riesgo de que los pélets absorban humedad y generar mayores emisiones de material particulado en la combustión (Obernberger & Thek, 2010). Respecto a los resultados obtenidos, los pélets de P-CF obtuvieron la durabilidad con el valor más cercano al requerido por la norma, de tal forma que podrían utilizarse en mercados locales, donde no existan grandes necesidades de manipulación, sin ver afectada su calidad. No sucede lo mismo con los pélets de P-SF, los

cuales tuvieron valores muy bajos de durabilidad mecánica por lo que, es preferible el uso de fécula de maíz como aglutinante para mejorar este parámetro.

**Tabla 16**

*Cumplimiento de los parámetros de calidad de los pélets obtenidos según la certificación ENplus y la norma EN 17225-2 (2014). El símbolo ✓ indica que los pélets se incluyen en al menos una clasificación (A1, A2, B, ..., I3) y el símbolo × indica que no se incluyen en ninguna.*

Notas. sr = según se recibe y bs = base seca. mg/kg: referido a mg del elemento respecto a 1 kg de biomasa en base seca, calculado como (EN 16967:2015):

Propiedad	ENplus® (uso comercial y residencial)			EN 17225-2 (uso industrial)			Pélets de aguacate		Observaciones
	A1	A2	B	I1	I2	I3	P-CF	P-SF	
Diámetro (D, mm)	6 ± 1 o 8 ± 1			6 ± 1 o 8 ± 1			6.08	✓ 6.09	✓ Las dimensiones de los pélets, la forma, así como la distribución de tamaños tienen efectos en los sistemas de alimentación de combustible, la tecnología de combustión, propiedades de secado, formación de polvo y la seguridad operativa durante el transporte de combustible (Abdoli <i>et al.</i> , 2018; Hartmann, 2019; Tumuluru, 2020).
Longitud (L, mm)	3.15 < L ≤ 40 <sup>2)</sup>			3.15 < L ≤ 40 <sup>2)</sup>			16.73	✓ 15.68	✓ La humedad de ambos pélets es baja, lo cual es favorable, ya que una alta humedad y variable da como resultado pérdidas de materia seca y reduce el poder calorífico (Tumuluru, 2020).
Humedad (% peso, sr)	≤ 10			≤ 10			8.85	✓ 8.31	✓ El contenido de cenizas cabe dentro de las categorías A2, B, I2 e I3. Un mayor contenido de ceniza puede resultar en la emisión de partículas, ensuciamiento de la superficie de transferencia de calor, interacciones químicas de combustión (Tumuluru, 2020) además, de los costos implicados en la disposición de las cenizas (Abdoli <i>et al.</i> , 2018). Una desviación de los valores típicos puede deberse a contaminación por suelo/arena (EN 17225-1, 2014) principalmente en la corteza.
Cenizas (% peso, bs)	≤ 0.7	≤ 1.2	≤ 2.0	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 3.0	1.2	✓ 1.2	✓ La durabilidad mecánica de ambos pélets se encuentra por debajo del valor mínimo. Una durabilidad baja implica una mayor generación de finos durante la manipulación de los pélets (Hartmann, 2019) y, por el contrario, la durabilidad mecánica alta se traduce a una mayor estabilidad de los pélets durante su transporte y almacenamiento (Abdoli <i>et al.</i> , 2018).
Durabilidad mecánica (% peso, sr)	≥ 98.0	≥ 97.5		≥ 97.5	≥ 96.5		95.2	× 86.7	✓ El poder calorífico obtenido supera el valor mínimo. Una desviación de los valores típicos puede deberse a al contenido de cenizas o simplemente al contenido de material combustible de menor poder calorífico (EN 17225-1, 2014).
<sup>1)</sup> Poder calorífico neto (MJ/kg, sr)	≥ 16.5			≥ 16.5			18.10	✓ 18.11	× Ambos pélets tuvieron una densidad aparente baja, lo cual no es favorable ya que, este parámetro influye en la logística (p. ej., almacenamiento, transporte, costes de manipulación) (Abdoli <i>et al.</i> , 2018; Hartmann, 2019; Tumuluru, 2020).
Densidad aparente (DA, kg/m <sup>3</sup> , sr)	600 ≤ DA ≤ 750			≥ 600			585.45	× 580.97	✓ Según la norma EN 17225-2, 2014, debe declarar tipo y cantidad de aditivo, en este caso fue fécula de maíz.
Aditivos (% peso, sr)	≤ 2 <sup>3)</sup>			< 3 <sup>3)</sup>			1.8	✓ 0	✓ El contenido de nitrógeno es relativamente bajo, aceptable para una clasificación B. Un contenido alto en nitrógeno representaría un aumento de emisiones NOx, N <sub>2</sub> O y HCN (Abdoli <i>et al.</i> , 2018; Hartmann, 2019; Tumuluru, 2020).
Nitrógeno (% peso, bs)	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.3	≤ 0.6		0.81	✓ 0.81	✓ El contenido de azufre por debajo de lo especificado por lo que podría incluirse en cualquier categoría. Un contenido alto en azufre está asociado con la emisión de SOx y puede causar corrosión (Abdoli <i>et al.</i> , 2018; Tumuluru, 2020).
Azufre (% peso, bs)	≤ 0.04	≤ 0.05		≤ 0.05			< 0.01	✓ < 0.01	✓ No se detectó la presencia de arsénico, plomo ni mercurio, mientras que las concentraciones de cadmio, cromo, níquel y zinc se encuentran aún dentro de los requerimientos, no obstante, el contenido de cobre es muy elevado superando casi en 50 veces el valor máximo. La presencia de metales pesados en niveles altos pueden causar emisiones de dichos metales, impactos catalíticos (como la formación de dioxinas), emisión de material particulado, emisión de aerosoles, y problemas de mantenimiento (Hartmann, 2019; Abdoli <i>et al.</i> , 2018; Tumuluru, 2020). Cuando hay una desviación de la concentración de metales pesados, esta puede ser debido a la contaminación con suelo/arena, por el uso de fertilizantes, la utilización de maquinas o por la propia contaminación medioambiental (EN 17225-1, 2014).
Arsénico (mg/kg, bs)	≤ 1.0			≤ 2			0	✓ 0	
Cadmio (mg/kg, bs)	≤ 0.5			≤ 1.0			0.006	✓ 0.006	
Cromo (mg/kg, bs)	≤ 10			≤ 15			0.1	✓ 0.1	
Cobre (mg/kg, bs)	≤ 10			≤ 20			11.6	✓ 11.6	
Plomo (mg/kg, bs)	≤ 10			≤ 20			0	✓ 0	
Mercurio (mg/kg, bs)	≤ 0.1			≤ 0.1			0	✓ 0	
Níquel (mg/kg, bs)	≤ 10			-			0.01	✓ 0.01	
Zinc (mg/kg, bs)	≤ 100			≤ 200			1.5	✓ 1.5	

W<sub>i, Fuel</sub> = W<sub>i, ash</sub> \* Ash/100, donde W<sub>i, Fuel</sub> es la concentración del elemento en el combustible en mg/kg en base seca, W<sub>i, ash</sub> es la concentración del elemento en la muestra de cenizas analizada y Ash se refiere al contenido de cenizas en determinado para la misma muestra de ensayo (1.21 %, en este caso).

<sup>1)</sup>Poder calorífico neto = poder calorífico inferior (PCI) a presión constante. Reportado según se recibe (% de humedad del pélet, en este caso).

<sup>2)</sup>Pélets con L > 40 mm: máximo 1%. No se admiten pélets > 45 mm.

<sup>3)</sup>La cantidad de aditivo en la producción está limitada al 1.8 % en peso y 0.2 % en postproducción (p. ej. Aceites de recubrimiento).

Con base en los resultados obtenidos en la caracterización de los pélets de poda de aguacate que se muestran en la Tabla 16 respecto a los valores de referencia, se cumple con la mayoría de los requisitos de calidad para su uso residencial, comercial e industrial. Sin embargo, en cuanto a la durabilidad mecánica y la densidad aparente, P-CF y P-SF no cumplen con los valores óptimos sugeridos por la normativa europea. A continuación, se explica la importancia de estos parámetros y las alternativas de uso final.

La densidad a granel de los pélets obtenidos se encuentran cercanos al valor umbral fijado para las distintas clasificaciones de pélets, sin embargo, se encuentran por debajo de dicho umbral, lo que los vuelve de menor calidad. Una baja densidad aparente tiene implicaciones en los costos de transporte, almacenamiento y manipulación de los pélets, por lo que se generan mayores costos operativos (Abdoli *et al.*, 2018; Hartmann, 2019; Tumuluru, 2020).

En cuanto a los parámetros químicos, se cumple con todos los requisitos de calidad. Si bien, se encontró un valor relativamente alto para el contenido de Cu (11.6 mg/kg), este valor, es aceptable para su uso en el sector industrial según la EN 17225-2 (2014). La concentración de Cu en coníferas y frondosas según la EN 17225-1 (2014), se encuentra entre 0.5 y 10 mg/kg. Se han reportado concentraciones de Cu en briquetas obtenidas a partir de poda de guayaba (2.65 mg/kg) (Ivanova *et al.*, 2018), así como también se ha reportado para pélets con biomasa de distinto origen: poda de árbol de olivo (2.93 mg/kg) y avellana (6.10 mg/kg) (Acampora *et al.*, 2021), poda de vid (24.95 mg/kg) (Nunes *et al.*, 2021), siendo la poda de vid la que presenta la concentración más alta, 2.1 veces mayor al valor obtenido en el presente estudio para P-CF y P-SF. El Cu, al igual que otros metales pesados como el Cd, Pb y Zn se han identificado como principales formadores de aerosoles que aumentan la emisión de material particulado en la combustión de biomasa, además se asocian con problemas de corrosión y formación de depósitos de cloruros en los equipos de combustión (Brunner, 2006; Quiñones-Reveles *et al.*, 2021).

Para mejorar la calidad de los pélets obtenidos, se podría emplear la formulación y optimización de mezclas de biomasa de poda de árboles de aguacate con otra fuente de biomasa alternativa. La formulación de mezclas ha sido propuesta por varios autores para mejorar la calidad de pélets (Zanneti *et al.*, 2017; Pollex *et al.*, 2018; Acampora *et al.*, 2021). Ahora bien, si tenemos en cuenta que la durabilidad mecánica puede ser optimizada a partir de la variación del tamaño de partícula y contenido de humedad (optimizando el peletizado), aunado a la posibilidad de utilizar algunos aditivos como en este caso la fécula de maíz, tenemos que este parámetro no representa un obstáculo importante para el uso de esta biomasa como biocombustible sólido densificado (pélet) (Tumuluru, 2015; Abdoli *et al.*, 2018; Kocsis & Csanády, 2019; Thiffault *et al.*, 2019). En cuanto al contenido de minerales en biomasa, algunos autores han probado la efectividad de la formulación óptima de mezclas con pino, que ayuda a reducir el contenido de Cu y otros elementos (Nunes *et al.*, 2021), por otro lado, en cuanto a parámetros de calidad como la durabilidad mecánica y la densidad a granel en pélets, la formulación de mezclas con aserrín de pino también se ha aprobado como una alternativa viable para la mejora de dichos parámetros (Nunes *et al.*, 2021; Woo *et al.*, 2021).

#### 8.4.1. Índice de calidad de pélets (ICP)

En la Tabla 17 se presentan los valores utilizados para el cálculo del ICP para cada uno de los 8 tipos de pélets evaluados.

**Tabla 17**

*Parámetros de calidad empleados para el cálculo del índice de calidad de pélets. Parámetros seleccionados y valores medidos correspondientes a cada uno de los pélets evaluados.*

Parámetro	Valores medidos para cada tipo de pélet							
	P-CF	P-SF	PA	PO	PO2	PG	PV	PC
Densidad a granel (kg/m <sup>3</sup> )	585.45	580.97	581	562	670	540	732.20	710
Durabilidad mecánica (%)	95.21	86.68	98.06	98.26	98.40	95.90	98.30	67.90
Humedad (%)	8.85	8.31	8.68	8.41	6.30	11.90	6.90	8.70
Cenizas (%)	1.22	1.22	3.10	2.50	6.20	3.90	4.20	2.50
PCI (MJ/kg)	18.10	18.11	17.21	16.83	16.84	15.71	17.80	20.10
N (%)	0.81	0.81	0.77	1.24	1.17	0.83	0.59	2.91
S (%)	0.01	0.01	0.00	0.00	0.08	0.13	0.03	0.12

Nota. PA: pélets de poda de árbol de avellana, PO: pélets de poda de olivo (Acampora *et al.*, 2021), PO2: pélets de poda de olivo (Kougioumtzis *et al.*, 2021), PG: pélets de cáscara de semilla de girasol (Toscano *et al.*, 2018), PV: pélets de poda de vid y PC: pélets de restos de café molido (Woo *et al.*, 2021).

En la Tabla 18 se presentan los resultados del IP para los pélets evaluados. En la tabla se presentan para cada parámetro, los índices más bajos en color verde y los más altos en rojo, siendo los valores más bajos los que más se acercan a la calidad deseable.

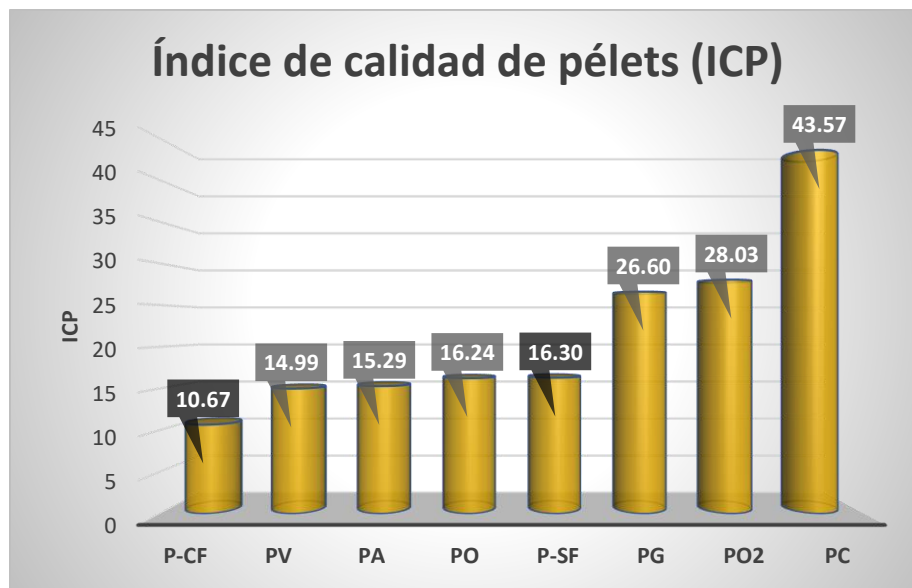
El índice de calidad de pélets (ICP) es un índice que engloba la calidad de los pélets con base en los parámetros evaluados, en este caso siete parámetros de calidad. Cabe recordar que, como se mencionó en la sección 7.6.1., a un nivel más bajo del índice, la calidad del pélet es mejor. De la Tabla 18 podemos observar que el parámetro con el índice más alto fue la durabilidad mecánica, particularmente para pélets de restos de café molido (PC). Para este mismo parámetro se puede observar como el índice de PC (IP = 20.7) supera por más de 50 veces al correspondiente de pélets de poda de olivo (PO2) (IP = 0.4). El contenido de cenizas fue el parámetro que presentó el segundo índice más alto con IP = 19.2, el cual corresponde a PO2. En contraste, el parámetro con valores más cercanos a la calidad deseable (según los valores de referencia de la Tabla 3, sección 7.6.1.), fue el poder calorífico inferior (PCI), siendo PC los pélets de mejor calidad con un IP = -2.0, es decir, un poder calorífico más alto y por tanto más favorable que el valor de referencia.

**Tabla 18**

*Índice de calidad de pélets por parámetro evaluado. Índice del parámetro (IP) para cada uno de los pélets evaluados. En código de colores se indican los valores más bajos (mayor calidad) en color verde y los más altos (menor calidad) en color rojo, para cada parámetro.*

Parámetro	Índice del parámetro (IP)							
	P-CF	P-SF	PA	PO	PO2	PG	PV	PC
Densidad a granel	1.3	1.4	1.4	1.7	-0.3	2.1	-1.5	-1.1
Durabilidad mecánica	2.5	8.2	0.6	0.5	0.4	2.1	0.5	20.7
Humedad	0.7	0.6	0.7	0.6	0.1	1.5	0.2	0.7
Cenizas	2.7	2.7	9.0	7.0	19.3	11.7	12.7	7.0
PCI	-0.3	-0.3	0.4	0.7	0.7	1.7	-0.1	-2.0
N	3.7	3.7	3.5	5.9	5.6	3.8	2.5	14.7
S	0.1	0.1	-0.3	-0.3	2.3	3.8	0.7	3.5

Los resultados del ICP reflejan que tanto se alejan los pélets evaluados de la calidad deseable según los valores de referencia (pélets de madera de calidad A1, certificación *ENplus*), donde un ICP más bajo indica también una mejor calidad. En la Gráfica 8 se presentan los ICP calculados para los pélets sujetos a evaluación.



**Gráfica 8.** Índice de calidad de pélets: P-CF, P-SF y pélets de referencia.

En el gráfico se puede observar el ranking de calidad, donde los pélets de aguacate (P-CF y P-SF) ocupan el primero y el quinto lugar, respectivamente (ver Gráfica 8). De los pélets evaluados, seis provienen de biomasa de poda de frutales (P-CF, P-SF, PA, PO, PO2 y PV) donde la mejor calidad la obtuvieron P-CF (ICP=10.67) mientras que PO2 (ICP=28.03) fueron los de más baja calidad, debido principalmente al alto contenido de cenizas.

Los pélets procedentes de biomasa no leñosa, es decir, PG y PC, representan dos de los pélets con más baja calidad dentro del ranking, con un ICP de 28.03 y 43.57, respectivamente (ver Gráfica 8). A partir de este índice se puede observar el contraste entre la calidad de pélets procedentes de biomasa leñosa y no leñosa, siendo común para esta última encontrar una calidad inferior para algunos parámetros como el contenido de cenizas, N y S (EN 17225-1, 2014; Tumuluru, 2020).

En el ranking general, tenemos que los pélets de mejor calidad son P-CF (ICP = 10.67) y los de peor calidad fueron los de PC (ICP = 43.57), siendo cuatro veces mayor el ICP de este último respecto al primero, donde los parámetros que más influyeron en el índice fueron la durabilidad mecánica, el contenido de N y el contenido de S, principalmente.

#### 8.4.2. Usos potenciales de los pélets

Los pélets frente a otras formas de biocombustibles sólidos, como las astillas, el aserrín o la leña, son económicamente más viables para el aprovechamiento energético de la biomasa, teniendo en cuenta que uno de los más importantes problemas asociados a su uso es su baja densidad energética aumentando los costos en el transporte y almacenamiento (Nunes *et al.*,

2014; Abdoli *et al.*, 2018; Pradhan *et al.*, 2018). Además, un combustible con una baja densidad energética puede repercutir en las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al transporte, las cuales aumentan (Martínez-Guido *et al.*, 2019).

Los pélets de buena calidad como aquellos que son certificados mediante el esquema de la *ENplus* (A1), pueden ser adoptadas fácilmente para su aprovechamiento energético en prácticamente cualquier tecnología de uso final, desde hornos o calderas residenciales, gasificadores, calderas industriales, entre otros (Pradhan *et al.*, 2018). No obstante, según su calidad específica determinada en función de los valores óptimos de cada parámetro (clasificación según las normas europeas), los pélets pueden ser usados en el sector residencial o comercial, o bien para uso industrial (ver Tabla 16). De manera general, para el caso de los pélets de aguacate con y sin fécula de maíz, ambos cumplen con la mayoría de los valores que exige la norma *ENplus* para uso residencial o comercial. Los únicos valores que salen de los rangos establecidos por las normas son la durabilidad mecánica y la densidad a granel. La baja durabilidad mecánica puede implicar una baja eficiencia en el proceso de combustión, así como, la relativamente baja densidad puede influir en la logística aumentando los costos de transporte y almacenamiento (Abdoli *et al.*, 2018; Hartmann, 2018; Tumuluru, 2020).

Los pélets de aguacate tienen propiedades adecuadas para uso en el sector residencial (Tabla 16), para tareas de cocción o calefacción. Desde el punto de vista económico, se ha estimado un costo de producción de pélets de 10 USD/GJ (Tauro *et al.*, 2018) puesto en planta, que sería viable frente al alto costo del gas licuado de petróleo (GLP) de alrededor de los 24 USD/GJ (precio calculado en dólares a partir del poder calorífico neto dado en unidades de Gigajoules) (PEMEX, 2022; CONUEE, 2022). Sin embargo, aún se requiere una mayor madurez de las tecnologías eficientes de cocción para el aprovechamiento energético de los pélets en el sector residencial y comercial donde podría sustituirse hasta un 73 % el uso de GLP del potencial técnico total estimado en México (Tauro *et al.*, 2018; Martínez-Bravo y Masera, 2020). Recientemente en México se ha propuesto una tecnología de gasificación donde se evalúa las propiedades químicas, la eficiencia energética, así como las emisiones generadas a partir del uso de fuentes forestales en gasificadores, encontrándose una reducción en la generación de emisiones de CO<sub>2</sub> y material particulado, además de una mejora en el rendimiento, esto, frente al uso de leña (Quiñones-Reveles *et al.*, 2021). Si bien, este tipo de tecnologías resultan prometedoras para su uso residencial en la calefacción de agua o cocción de alimentos (Quiñones-Reveles *et al.*, 2021), aún es necesario el fomento del uso de biocombustibles que vaya de la mano con un fuerte apoyo económico por parte del gobierno de modo que se favorezca a la competitividad de las opciones bioenergéticas, tal como aseguran Martínez-Bravo y Masera (2020).

El único parámetro cuyo valor queda fuera de las especificaciones de la norma para usos residenciales, es el contenido de Cu. La concentración relativamente alta en Cu en la biomasa estudiada puede representar una mayor emisión de material particulado y aerosoles en la combustión (Brunner, 2006; Quiñones-Reveles *et al.*, 2021). Algunos autores reportan que incluso en la combustión de pélets comerciales se ha identificado la emisión de algunos metales, por ejemplo, Marcotte *et al.* (2020) identificaron la presencia de Cu y otros metales pesados como Cd, Pb, y Zn en la combustión de algunos pélets comerciales en caldera doméstica, por su parte Alves *et al.* (2019) caracterizaron las cenizas generadas en tres

tecnologías distintas de calefacción residencial a partir de pélets comerciales y pélets de fuentes agrícolas de biomasa donde determinaron concentraciones relativamente altas en Cu, Cr, Zn y Mn (Alves *et al.*, 2019). Por lo anterior, es necesario considerar el contenido de metales pesados en la biomasa, pero también se debe considerar el tipo de tecnología empleada para determinar la posibilidad de uso.

Cuando el contenido de Cu es mayor a 10 mg/kg, pero inferior a 20 mg/kg, el uso recomendado según la EN 17225-2 (2014) es en el sector industrial, donde se suelen tener controles más avanzados y limpieza de gases de combustión. En el sector industrial las calderas con diseños optimizados reducen emisiones, además, como medida secundaria también suelen contar con sistemas de control de emisiones (Höfer *et al.*, 2019). En este sector, el pélet podría ser técnicamente viable para reemplazar 883 PJ/año (18% de la demanda final de energía a nivel nacional) y mitigar 66 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> (MtCO<sub>2e</sub>) (Tauro *et al.*, 2018). Sin embargo, desde un enfoque económico, el uso de pélets sería viable para reemplazar GLP (24 USD/GJ), diésel (32 USD/GJ) y combustóleo (11.4 USD/GJ) (PEMEX, 2022; CONUEE, 2022) y mitigar 35 MtCO<sub>2e</sub>, valores calculados del total de mitigación por sustitución de GLP, diésel y combustóleo para el sector industrial en México a partir de las estimaciones realizadas por Tauro *et al.* (2018). Estos combustibles son ampliamente utilizados en el sector agroindustrial para generar vapor de proceso. Existen varias agroindustrias en la región de estudio que podrían reemplazar combustibles fósiles por pélets, generando ahorros económicos por sustitución de combustibles y mitigando emisiones contaminantes. Un caso concreto son las destiladoras de mezcal y tequila, que actualmente son usuarios intensivos de leña, GLP y combustóleo y demuestran interés en alternativas que permitan reducir sus emisiones (Tauro *et al.*, 2022).

Con base en la discusión anterior, la baja durabilidad mecánica y la densidad a granel de los pélets obtenidos, favorece el uso a nivel local, por lo que una opción para este tipo de pélets sería utilizarlos dentro de radios cortos de transporte, donde la baja densidad no cobre tanta importancia en los costos logísticos.

Teniendo en cuenta el contexto rural en el que se ubican la mayoría de los huertos de aguacate en el sitio de estudio (municipio de Salvador Escalante, Michoacán) y pensando en un aprovechamiento local, una alternativa sería la optimización de mezclas de biomasa para obtener pélets de mejor calidad, dicha mezcla puede ser formulada a partir de poda de aguacate en combinación con aserrín de pino el cual suele tener concentraciones bajas en cenizas (Nunes *et al.*, 2021; Woo *et al.*, 2021). La propuesta concreta en este estudio es la transformación y aprovechamiento de los residuos de poda en formato de pélets, esto a nivel regional con la conformación de cooperativas con una gestión intervenida por las localidades, donde, el vínculo entre los productores podría ser la junta local de sanidad vegetal de Salvador Escalante (JLSVSE) en este caso, quienes tienen comunicación continua con los productores de este municipio. Dichas cooperativas pueden extenderse a otros municipios productores de aguacate, que también cuentan con su propia junta local. La gestión de los residuos podría centralizarse en sitios geográficamente estratégicos para la colecta, acondicionamiento y producción de los pélets. Los pélets podrían destinarse para el uso doméstico para la cocción de alimentos mediante estufas eficientes. En cuanto a la tecnología de uso final, López-Sosa *et al.* (2019) generaron una metodología para el desarrollo de tecnología apropiada, que involucra la participación de usuarios potenciales, la identificación

de las necesidades energéticas prioritarias y el desarrollo de la tecnología y su proceso de transferencia. Este esquema podría ser aplicado para el aprovechamiento energético en las localidades del sitio de estudio, al igual que otras localidades de la región aguacatera. Finalmente, desde este mismo enfoque, el uso de pélets puede ser visto como oportunidad de mercado para la industria aguacatera y las comunidades locales, reduciéndose la dependencia del uso de leña. En este sentido, Ruíz-Carmona *et al.* (2021) y Martínez-Guido *et al.* (2019) sugieren que la integración de los pélets contribuiría a la generación de empleos formales y el fomento a la creación de empleos en las regiones generadoras de estos insumos y, por tanto, al desarrollo social, además de favorecer a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

México cuenta con experiencia en el desarrollo e implementación de tecnologías eficientes en el sector residencial rural en el que suelen utilizarse fogones de leña tradicionales, los cuales, al ser poco eficientes acarrear problemas de impacto ambiental y riesgos a la salud (Maserá *et al.*, 2011). El uso de tecnologías eficientes para la cocción de alimentos y el aprovechamiento de los pélets producidos a partir de poda de aguacate puede ser una alternativa de aprovechamiento local en comunidades de la región aguacatera de Michoacán, sin embargo, tal como sugieren Maserá *et al.* (2011), existen algunos retos para la implementación de tecnologías eficientes, por ejemplo, el desarrollo de dichas tecnologías y el garantizar que las familias tengan acceso a ellas, por otro lado, se requiere sensibilizar a las familias usuarias de fogones tradicionales sobre los problemas que ocasiona su uso, además, se requiere impulsar y promover programas para el uso de estas tecnologías y que finalmente beneficien a las familias.

## 9. Conclusiones

En el presente estudio, fue posible identificar las principales propiedades de interés para el aprovechamiento energético de la biomasa procedente de poda de árboles de aguacate. A partir de los resultados obtenidos, se encontró que la composición química de la biomasa estudiada difiere y que, particularmente la biomasa leñosa (clase R) bien pueden formar parte de la base de recursos potencialmente utilizables como biocombustibles sólidos, en tanto que, la composición química de ramas y hojas (clase RPH) puede ser una limitante, principalmente por el contenido de cenizas y la naturaleza de estas, encontrándose concentraciones elevadas de N y S, así como de elementos pesados como Cd, Cu, y Zn.

Se realizó un análisis termogravimétrico donde, se pudo observar el comportamiento de degradación termoquímica de ramas con y sin corteza, logrando identificar el desempeño de ambas fracciones de biomasa a partir de las curvas TGA-DTG obtenidas.

De los pélets elaborados, se encontró que la mejor calidad fue para pélets con fécula (P-CF) frente a los pélets sin fécula (P-SF), esto definido a partir de los parámetros de durabilidad mecánica e índice de resistencia al impacto, para los cuales se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Las diferencias encontradas entre ambos tipos de pélets con y sin fécula, a las mismas condiciones de procesamiento, reflejaron el efecto de la fécula de maíz en la mejora de la calidad en las propiedades mecánicas mencionadas.

Como resultado de la evaluación de calidad de los pélets obtenidos con base en la certificación *ENplus* y la norma 17225-2 (2014), se observó que estos cumplen con la mayoría de los requisitos de calidad analizados para uso residencial, comercial e industrial, con excepción de la durabilidad mecánica y densidad a granel, cuyos valores se encuentran por debajo del umbral mínimo, adicionalmente, para el caso de uso residencial o comercial, el contenido de Cu (11.6 mg/kg), queda fuera de la especificación de calidad de la *ENplus* (10 mg/kg). Mediante el índice de calidad de pélets (ICP) generado, se contrastaron las calidades de P-CF, P-SF y pélets de poda de frutales y de biomasa agrícola reportados en la literatura, donde, destacaron P-CF como los de mejor calidad, mientras que P-SF se ubicaron en una calidad intermedia. Además, se logró identificar a la durabilidad mecánica como el parámetro de mayor influencia en el ICP.

Finalmente, la elaboración de pélets a partir de poda de árboles de aguacate, puede considerarse como una alternativa viable de aprovechamiento energético, siempre y cuando puedan abatirse las limitaciones técnicas señaladas anteriormente.

## 10. Perspectivas y algunas recomendaciones

- La gestión de los grandes volúmenes de biomasa generados en la región aguacatera orientada a la producción de pélets biocombustibles, puede representar una fuente de ingresos, además de ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de aprovechamiento local.
- La formulación y optimización de mezclas de biomasa de aguacate con otras fuentes de biomasa como la madera de pino, así como la optimización del proceso de peletizado, podrían ayudar a mejorar de la calidad de los pélets.
- La metodología desarrollada en el presente estudio y la información generada, pueden ser una herramienta útil para futuras investigaciones acerca del aprovechamiento de residuos de poda de otro tipo de árboles frutales. México cuenta con una amplia variedad de cultivos de frutales que podrían suponer una oferta potencial de biomasa importante y que permitiría inclusive ampliar la matriz energética del país.
- Para poder garantizar un aprovechamiento eficiente de los recursos biomásicos de poda de aguacate disponibles en la región aguacatera del estado de Michoacán, es necesaria la optimización del proceso de obtención de biomasa, la producción y aprovechamiento energético de pélets, contemplando las distintas etapas que parten desde la generación de residuos hasta el potencial uso final, para ello deben tenerse en cuenta aspectos de sustentabilidad, es decir, considerar las implicaciones sociales, económicas y ambientales.
- Considerando la importante trascendencia energética que tienen los residuos de esta biomasa, es importante comentar que, a partir de los datos del TGA y con la finalidad de profundizar en esta investigación a futuro, es recomendable realizar análisis cinéticos y termodinámicos de la biomasa de poda de árboles de aguacate con el objetivo de determinar los parámetros cinéticos como la energía de activación y el factor de frecuencia o pre-exponencial, así como los parámetros termodinámicos en relación a las variaciones de entalpía, energía libre de Gibbs y entropía. Esto permitiría definir más claramente el mejor uso potencial.

## 11. Referencias

- Abdel-Aal, E. S., Hucl, P., & Sosulski, F. W. (1997). Characteristics of canaryseed (*Phalaris canariensis* L.) starch. *Starch-Stärke*, 49(12), 475-480. <https://doi.org/10.1002/star.19970491202>
- Abdoli M.A., Golzary A., Hosseini A., Sadeghi P. (2018). Biomass Densification. En: *Wood Pellet as a Renewable Source of Energy* (pp. 33-46). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74482-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74482-7_2)
- Acampora, A., Civitarese, V., Sperandio, G., & Rezaei, N. (2021). Qualitative Characterization of the Pellet Obtained from Hazelnut and Olive Tree Pruning. *Energies*, 14(14), 4083. <https://doi.org/10.3390/en14144083>
- Agbor, E., Zhang, X., & Kumar, A. (2014). A review of biomass co-firing in North America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 930-943. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.195>
- Alakangas, E. (2011). European Standards for Fuel Specification and Classes of Solid Biofuels. En: Grammelis, P. (eds). *Solid Biofuels for Energy*. Green Energy and Technology. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0_2)
- Alvarado-Flores, J. J., Rutiaga-Quiñones, J. G., Ávalos-Rodríguez, M. L., Alcaraz-Vera, J. V., Espino-Valencia, J., Guevara-Martínez, S. J., ... & Alfaro-Rosas, A. (2020). Thermal degradation kinetics and FT-IR analysis on the pyrolysis of *pinus pseudostrobus*, *pinus leiophylla* and *pinus montezumae* as forest waste in western Mexico. *Energies*, 13(4), 969. <https://doi.org/10.3390/en13040969>
- Alves, C. A., Font, O., Moreno, N., Vicente, E. D., Duarte, M., Tarelho, L. A., & Querol, X. (2019). Mineralogical, chemical and leaching characteristics of ashes from residential biomass combustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 22688-22703. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05231-w>
- Arcibar-Orozco, J.A., Josue, D.B., Ríos, J.C., Rangel, J.R. (2014). Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. *Chemical Engineering Journal*, 249 (1), 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.096>
- Arteaga-Pérez, L. E., Segura, C., Bustamante-García, V., Cápiro, O. G., & Jiménez, R. (2015). Torrefaction of wood and bark from *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: Focus on volatile evolution vs feasible temperatures. *Energy*, 93, 1731-1741. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.007>
- Atuesta-Boada, L. & Sierra-Vargas, F. (2015). Atuesta; Sierra. Caracterización Físico - Química de Pellets producidos a partir de mezclas 50/50 Carbón Bituminoso/Madera Residual. *Informador Técnico*, 79(1), 18-25. ISSN: 0122-056X
- Bajpai, P. (2020). Biomass properties and characterization. En: *Biomass to energy conversion technologies: The road to commercialization* (pp. 21-29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818400-4.00003-7>
- Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J., & Bajwa, S. G. (2018). A review of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- Barajas, A. (2021). Capacidad de sostenibilidad ambiental, social y económica del cultivo de aguacate en uruapan, michoacán, méxico. *Suelos Ecuatoriales*, 51(1), 1-13. [https://doi.org/10.47864/SE\(51\)2021p1-12\\_135](https://doi.org/10.47864/SE(51)2021p1-12_135)

- Bazargan, A., Rough, S. L., & McKay, G. (2014). Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel. *Biomass and Bioenergy*, 70, 489-497. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.015>
- BeMiller, J. N. & Whistler, R. L. (1996). Carbohydrates. En: Fennema. O. (eds). *Food Chemistry* (3th ed.) (pp. 158-221). New York: Marcel Dekker. ISBN: 0-8247-9691-8
- Bernabé, R. (2011). *Estudio químico de la madera del tocón, fuste y ramas de Persea americana, de la región de Uruapan, Michoacán*. [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/177](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/177)
- Bianchini, L., Costa, P., Dell’Omo, P. P., Colantoni, A., Cecchini, M., & Monarca, D. (2021). An Industrial Scale, Mechanical Process for Improving Pellet Quality and Biogas Production from Hazelnut and Olive Pruning. *Energies*, 14(6), 1600. <https://doi.org/10.3390/en14061600>
- Brand, M. A., & Jacinto, R. C. (2020). Apple pruning residues: Potential for burning in boiler systems and pellet production. *Renewable Energy*, 152, 458-466. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.037>
- Brand, M. A., Barnasky, R. R. D. S., Carvalho, C. A., Buss, R., Waltrick, D. B., & Jacinto, R. C. (2018). Thermogravimetric analysis for characterization of the pellets produced with different forest and agricultural residues. *Ciência Rural*, 48(11), 1-10. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180271>
- Brebu, M., & Vasile, C. (2010). Thermal degradation of lignin—a review. *Cellulose Chemistry & Technology*, 44(9), 353-363. [https://www.researchgate.net/publication/237090542\\_Thermal\\_degradation\\_of\\_lignin\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/237090542_Thermal_degradation_of_lignin_-_A_Review)
- Brunner, T. (2006). *Aerosols and coarse fly ashes in fixed-bed biomass combustion: formation, characterisation and emissions* [Tesis doctoral, Technische Universiteit Eindhoven]. The Netherlands, Eigenverlag. <https://doi.org/10.6100/IR626201>
- Bryers, R. W. (1996). Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in energy and combustion science*, 22(1), 29-120. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(95\)00012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00012-7)
- Burgos, A., Anaya, C., & Solorio, I. (2011). Impacto ecológico del Cultivo de Aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: Definición de una Tipología de Productores. Informe final a la Fundación Produce Michoacán (FPM) y la AALPAUM. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA/UNAM Campus Morelia). Morelia, Michoacán, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33800.01281>
- Burhenne, L., Messmer, J., Aicher, T., & Laborie, M. P. (2013). The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.012>
- Burmester, A. (1980). Holzfeuchtigkeit in Nadelhölzern. Jahreszeitliche Einflüsse auf die Eigenschaften des Splint-und Kernholzes von Nadelbäumen. *Holz-Zentralblatt*, 106(91), 1303-1304. <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/9367>
- Busquets-Ferrer, M., Czabany, I., Vay, O., Gindl-Altmutter, W., & Hansmann, C. (2021). Alkali-extracted tree bark for efficient bio-based thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 271, 121577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121577>
- Callejas, E. S., y Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157), 75-82. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>

- Camarena-Tello, J. C., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., González-Laredo, R. F., Pedraza-Bucio, F. E., López-Albarrán, P., ... & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Chemical composition of biomass generated in the guava tree pruning. *EXCLI Journal*, 14, 204-212. <http://dx.doi.org/10.17179/excli2014-467>
- Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and bioenergy*, 35(1), 402-410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>
- Carrillo-Parra, A., Ngangyo-Heya, M., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch, R., Rutiaga-Quiñones, J. G., and Correa-Méndez, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *PeerJ*. 4(6), e5504. <https://doi.org/10.7717/peerj.5504>
- Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Ríos-Saucedo, J. C., Ruiz-García, V. M., Ngangyo-Heya, M., Nava-Berumen, C. A., & Núñez-Retana, V. D. (2021). Quality of Pellet Made from Agricultural and Forestry Waste in Mexico. *BioEnergy Research*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10327-8>
- Castells, X. E. (2012). *Biomasa y Bioenergía: Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos. ISBN: 978-849969-125-1
- Chen, W. H., & Kuo, P. C. (2010). A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, 35(6), 2580-2586. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.054>
- Chen, W. H., Wang, C. W., Ong, H. C., Show, P. L., & Hsieh, T. H. (2019). Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*, 258, 116168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116168>
- Cherney, J. H., & Verma, V. K. (2013). Grass pellet Quality Index: A tool to evaluate suitability of grass pellets for small scale combustion systems. *Applied Energy*, 103, 679-684. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.050>
- Christ, D., Scherzinger, M., Neuling, U., Kaltschmitt, M. (2019). Thermochemical Conversion of Solid Biofuels: Processes and Techniques. En: Kaltschmitt M. (eds). *Energy from Organic Materials (Biomass)* (pp. 393-413). Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7\\_1042](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_1042)
- Cichy, W., Witczak, M., & Walkowiak, M. (2017). Fuel properties of woody biomass from pruning operations in fruit orchards. *BioResources*, 12(3), 6458-6470. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.6458-6470>
- Collard, F. X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594-608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>
- CONUEE (2022). Lista de combustibles 2022 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las Equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo. Accesado el 13 de marzo de 2022 en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/705806/Lista\\_de\\_combustibles\\_y\\_poderes\\_calorificos\\_2022.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/705806/Lista_de_combustibles_y_poderes_calorificos_2022.pdf)
- Dalimova, G. N., & Abduazimov, K. A. (1994). Lignins of herbaceous plants. *Chemistry of Natural Compounds*, 30(2), 146-159. <https://doi.org/10.1007/BF00629995>

- de Souza, H. J. P. L., Muñoz, F., Mendonça, R. T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., ... & Rodríguez-Soalleiro, R. (2021). Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. *Renewable Energy*, 163, 1802-1816. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.065>
- Demirbas, A. (2002). Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, 20(1), 105-111. <https://doi.org/10.1260/014459802760170420>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
- Díez, D., Urueña, A., Piñero, R., Barrio, A., & Tamminen, T. (2020). Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). *Processes*, 8(9), 1048, pp. 1-21. <https://doi.org/10.3390/pr8091048>
- Dilger, M., Orasche, J., Zimmermann, R., Paur, H. R., Diabaté, S., & Weiss, C. (2016). Toxicity of wood smoke particles in human A549 lung epithelial cells: the role of PAHs, soot and zinc. *Archives of Toxicology*, 90(12), 3029-3044. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1659-1>
- DOF. (2020). ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. Accesado el 5 de septiembre de 2021 en: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2021](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2021)
- Domínguez, M.P., Araus, K., Bonert, P., Sánchez, F., San Miguel, G., Toledo, M. (2014). The Avocado and Its Waste: An Approach of Fuel Potential/Application. En: Lefebvre G., Jiménez E., Cabañas B. (eds). *Environment, Energy and Climate Change II* (pp. 199-223). The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 34. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29129-1\\_291](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29129-1_291)
- dos Santos, H., do Nascimento, A. M., & Maria, M. A. (1999). Lignin structure and wood properties. *Wood and Fiber Science*, 31(4), 426-433. Accesado el 10 de agosto de 2021 en: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1808>
- Ebringerová, A., Hromádková, Z., Heinze, T. (2005). Hemicellulose. En: Heinze T. (eds) *Polysaccharides I* (pp. 1-67). Advances in Polymer Science, vol 186. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/b136816>
- EN 14780 (2018). Biocombustibles sólidos. Preparación de muestras. EN ISO 14780:2017, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 33p.
- EN 17225-1 (2014). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales. EN ISO 17225-1:2014, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 65p.
- EN 17225-2 (2014). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera. EN ISO 17225-2:2014, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 16p.
- EN 17827-2 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 2: Método del tamiz vibratorio con abertura de malla inferior o igual a 3,15 mm. EN ISO 15149-2:2016, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 17p.

- EN 17828 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. EN ISO 17828:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 14p.
- EN 17829 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y el diámetro de pélets. EN ISO 17829:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 10p.
- EN 17831-1 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets. EN ISO 17831-1:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 13p.
- EN 18122 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de contenido de cenizas. EN ISO 18122:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 12p.
- EN 18123 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil. EN ISO 18123:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 15p.
- EN 18125 (2018). Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. EN ISO 18125:2017, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 68p.
- EN 18134-2 (2017). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado. EN ISO 18134-2:2017, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 11p.
- EN 18847 (2017). Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad de partícula de pélets y briquetas. EN ISO 18847:2016, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 20p.
- Enes, T., Aranha, J., Fonseca, T., Lopes, D., Alves, A., & Lousada, J. (2019). Thermal properties of residual agroforestry biomass of northern Portugal. *Energies*, 12(8), 1418. <https://doi.org/10.3390/en12081418>
- ENplus (2015). Manual ENplus. Esquema de certificación de calidad para pélets de madera Parte 3: Requisitos de calidad de los pélets. Accesado el 12 de enero de 2021 en: <https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3>
- Fagerström, J., Steinvall, E., Boström, D., & Boman, C. (2016). Alkali transformation during single pellet combustion of soft wood and wheat straw. *Fuel Processing Technology*, 143, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.016>
- FAO. (2010). *Bioenergy and food security*. The BEFS Analytical Framework, Series 16. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Accesado el 5 de diciembre de 2021 en: <https://www.fao.org/3/i1968e/i1968e.pdf>
- Fengel, D. & Wegener, G. (1989). Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. de Gruyter: Berlín, Alemania, 613p. ISBN: 3-11-012059-3
- Fernández-Puratich, H., Vicente Oliver-Villanueva, J., Valiente, M., & Nuria Albert, Salvador Verdu. (2014). Pellets development from three woody species under Mediterranean conditions. *Madera y Bosques*, 20(3), 97-111. <https://www.researchgate.net/publication/279024138>
- Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., & Høibø, O. (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3342-3349. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.011>

- Forero-Nuñez, C. A., Jochum, J., & Sierra, F. E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17-23. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>
- Fredes, N. A. (2014). *Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la región de Los Lagos* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116613>
- Fromm, J. (2013). Xylem Development in Trees: From Cambial Divisions to Mature Wood Cells. En: Fromm J. (eds). *Cellular Aspects of Wood Formation*. Plant Cell Monographs, vol. 20. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4_1)
- Fuentes-Talavera, F. J., Silva-Guzmán, J. A., Rodríguez-Anda, R., Lomelí-Ramírez, M. G., Sanjuán-Dueñas, R., & Richter, H. G. (2011). Strength properties and natural durability of Avocado (*Persea americana* Mill.) branch wood. *Madera y bosques*, 17(1), 37-47. ISSN: 2448-7597
- García, D. P., Caraschi, J. C., Ventrone, G., Vieira, F. H. A., & de Paula Protásio, T. (2018). Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. *BioResources*, 13(2), 2898-2906. Accesado el 12 de febrero de 2022 en: [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_13\\_2\\_2898\\_Garcia\\_Comparative\\_Energy\\_Torrefied\\_Pellets](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_2_2898_Garcia_Comparative_Energy_Torrefied_Pellets)
- García, J., Morales, L. L., Mendoza, R. M., Coria, M. V., Aguirre, L. J., Sánchez, J. L., Vidales, J., ..., Alcántar, J. (2012). *Tecnología Produce Aguacate en Michoacán*. COFUPRO. Pp. 1-32. Accesado el 5 de diciembre de 2021 en: [https://www.academia.edu/36155673/II\\_TECNOLOG%8DA-PRODUCE\\_AGUA\\_CATE\\_EN\\_MICHOAC%81N](https://www.academia.edu/36155673/II_TECNOLOG%8DA-PRODUCE_AGUA_CATE_EN_MICHOAC%81N)
- García, J.L. (2013). Plagas y Enfermedades de importancia económica del aguacate. 1er. Foro Veracruzano de Fruticultura Y Cultivos Tropicales. Accesado el 3 de marzo del 2022 en: <https://docplayer.es/7542505-Plagas-y-enfermedades-de-importancia-economica-del-aguacate.html>
- García, J.L., Morales, L. L. J., Mendoza, A. R. M., Coria, M. M. V., Aguirre, P. L. J., Sánchez, F. J. L., ... & Alcántar, J. J. (2013). *Tecnología Produce Aguacate en Michoacán*. Accesado el 3 de marzo de 2022 en: <https://www.academia.edu/download/56048004/24michoacan.pdf>
- García, R., Gil, M. V., Rubiera, F., & Pevida, C. (2019). Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 251, 739-753. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141>
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel*, 117, 1139-1147. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.049>
- García-Maraver, A., & Carpio, M. (2015). Biomass pelletization process. En: García-Maraver, A. & Pérez-Jiménez, J. (eds). *Biomass Pelletization: Standards and Production* (pp. 53-64). WIT Press: Lightning Source, UK. ISBN: 978-1-78466-063-5
- García-Vargas, M. C., Contreras, M. D. M., & Castro, E. (2020). Avocado-Derived Biomass as a Source of Bioenergy and Bioproducts. *Applied Sciences*, 10(22), 8195. <https://doi.org/10.3390/app10228195>
- Gaur, S., & Reed, T. B. (1998). *Thermal data for natural and synthetic fuels*. New York: Marcel Dekker. ISBN: 0-8247-0070-8
- Gavilán, A., y Castro, J. (2007). Dioxinas, furanos y hexaclorobenceno (Capítulo 3). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México. Accesado el 7 de diciembre de 2021 en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/447/cap3.html>

- Ghebre-Sellassie, I. (1989). Mechanism of pellet formation and growth. *Pharmaceutical pelletization technology*, 37, 123-45. E-book ISBN: 9781003066231
- Gilvari, H., de Jong, W., & Schott, D. L. (2019). Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors-A review. *Biomass and Bioenergy*, 120, 117-134. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.013>
- Goldemberg, J., & Coelho, S. (2004). Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, 32(6), 711-714. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00340-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00340-3)
- González, I. D. (2013). *Potencial del aserrín generado en la transformación primaria de Pinus patula para la fabricación de pellets*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo, México]. Accesado el 7 de diciembre de 2021 en: <https://acortar.link/kEx2aC>
- González, J. F., Encinar, J. M., Canito, J. L., Sabio, E., & Chacón, M. (2003). Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 67(1), 165-190. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(02\)00060-8](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(02)00060-8)
- González-Hassig, A., & Talero-Rojas, G. F. (2014). Estudio de planta piloto para peletización de residuos madereros y su utilización como combustible en hornos ladrilleros. *Tecnura*, 18(40), 62-70. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.2.a05>
- Gracia, C. (2011). La madera: estructura, función, formación y mantenimiento. En: *Ecología Forestal: Estructura y producción de las masas forestales* (pp. 221-259). Accesado el 8 de diciembre de 2021 en: <http://www.kimerius.es/app/download/5797723622/Ecolog%C3%ADa+forestal.+Estructura%2C+funcionamiento+y+producci%C3%B3n+de+las+masas+forestales..pdf>
- Grønli, M. G., Várhegyi, G., & Di Blasi, C. (2002). Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(17), 4201-4208. <https://doi.org/10.1021/ie0201157>
- Gruber, L., Seidl, L., Zanetti, M., & Schnabel, T. (2021). Calorific Value and Ash Content of Extracted Birch Bark. *Forests*, 12(11), 1480. <https://doi.org/10.3390/f12111480>
- Günther, B., Gebauer, K., Barkowski, R., Rosenthal, M., & Bues, C. T. (2012). Calorific value of selected wood species and wood products. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 755-757. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0613-z>
- Gürdil, G. A., dağtekin, M., Demirel, B., Novak, ç. D. V., & Dok, M. (2019). *Determining pelleting parameters for orange pruning residues*. 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering (TAE), Prague, Czech Republic. Accesado el 2 de noviembre de 2021 en: <https://2019.tae-conference.cz/proceeding/TAE2019-026-Gurkan-A-K-Gurdil.pdf>
- Han, K., Gao, J., & Qi, J. (2019). The study of sulphur retention characteristics of biomass briquettes during combustion. *Energy*, 186, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.118>
- Han, K., Li, X., Qi, J., Zhu, Y., Long, S., Li, H., ... & Xu, Y. (2021). Synergistic effect of additives and blend on sulfur retention, NO release and ash fusibility during combustion of biomass briquettes. *International Journal of Green Energy*, 18(2), 187-202. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1847116>
- Hartmann, H. (2019). Solid Biofuels and Their Characteristics. En: Kaltschmitt, M. (eds). *Energy from Organic Materials (Biomass)*. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series. Springer, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7\\_245](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_245)
- Hernández, A. (2015). *Situación actual del sistema producto aguacate*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), Palacio de San

- Lázaro. Accesado el 12 de febrero de 2022 en: <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/16Situaci%C3%B3n%20actual%20del%20sistema%20producto%20aguacate.pdf>
- Hernández-Lauzardo, A. N., Méndez-Montealvo, G., Velazquez del Valle, M. G., Solorza-Feria, J., & Bello-Pérez, L. A. (2004). Isolation and partial characterization of Mexican *Oxalis tuberosa* starch. *Starch-Stärke*, 56(8), 357-363. <https://doi.org/10.1002/star.200300235>
- Herrera-Fernández, A. C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F. E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quiñones, J. G (2017). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encinos (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, (72), 136-154. <https://doi.org/10.35830/cn.v0i72.345>
- Higuchi, T. (1990). Lignin biochemistry: biosynthesis and biodegradation. *Wood Science and Technology*, 24(1), 23-63. <https://doi.org/10.1007/BF00225306>
- Höfer, I., Gollmer, C., & Kaltschmitt, M. (2021). Inorganic PM and K emissions during ashing of solid biofuels and Kaolinite—Data measurement in laboratory scale. *Fuel*, 296, 120704. Pp. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120704>
- Höfer, I., Kaltschmitt, M., & Beckendorff, A. (2019). Emissions from solid biofuel combustion, pollutant formation and control options. En: Kaltschmitt M. (eds). *Energy from Organic Materials (Biomass)*. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7\\_1043](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_1043)
- Holt, G. A., Blodgett, T. L., & Nakayama, F. S. (2006). Physical and combustion characteristics of pellet fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. *Industrial Crops and Products*, 24(3), 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.005>
- Hoong, Y. B., Paridah, M. T., Luqman, C. A., Koh, M. P., & Loh, Y. F. (2009). Fortification of sulfited tannin from the bark of *Acacia mangium* with phenol–formaldehyde for use as plywood adhesive. *Industrial Crops and Products*, 30(3), 416-421. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.012>
- Hupa, M., Karlström, O., & Vainio, E. (2017). Biomass combustion technology development—It is all about chemical details. *Proceedings of the Combustion institute*, 36(1), 113-134. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.152>
- Ibitoye, S. E., Jen, T. C., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- INEGI (2022). Espacio y Datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Accesado el 12 de enero de 2022 en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- INTAGRI (2017a). La Poda en el Cultivo de Aguacate. Serie Frutales Núm. 28. *Artículos Técnicos de INTAGRI*. México. Accesado el 20 julio de 2021 en: <https://www.intagri.com/articulos/frutales/la-poda-en-el-cultivo-de-aguacate>
- INTAGRI (2017b). Antracnosis en el Cultivo de Aguacate. Serie Fitosanidad. Núm. 81. *Artículos Técnicos de INTAGRI*. México. 4 p. Accesado el 03 de marzo del 2022 en: <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/antracnosis-en-el-cultivo-de-aguacate>
- Ivanova, T., Mendoza Hernández, A. H., Bradna, J., Fernández Cusimamani, E., García Montoya, J. C., & Armas Espinel, D. A. (2018). Assessment of Guava (*Psidium guajava* L.) wood biomass for briquettes’ production. *Forests*, 9(10), 613. <https://doi.org/10.3390/f9100613>

- Japhet, J.A., Tokan, A. & Kyauta, P. (2019). A Review of Pellet Production from Biomass Residues as Domestic Fuel. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 4(3), 835–842. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/4.3.34>
- Jelonek, Z., Drobniak, A., Mastalerz, M., & Jelonek, I. (2020). Assessing pellet fuels quality: A novel application for reflected light microscopy. *International Journal of Coal Geology*, 222, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103433>
- Jones, J.M., Lea-Langton, A.R., Ma, L., Pourkashanian, M. & Williams, A. (2014). Combustion of Solid Biomass: Classification of Fuels. En: *Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels* (pp. 9-24). SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6437-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6437-1_2)
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kaltschmitt, M. & Magdowski A. (2019). Bioenergy within Global Energy Systems: Current and Future Contribution. En: Kaltschmitt M. (eds). *Energy from Organic Materials (Biomass)* (pp. 1299-1319). Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7\\_991](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_991)
- Kampe A. & Magel E. (2013). New Insights into Heartwood and Heartwood Formation. En: Fromm J. (eds). *Cellular Aspects of Wood Formation* (pp. 71-95). Plant Cell Monographs, vol 20. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4_3)
- Kamperidou, V., Lykidis, C., & Barmoutis, P. (2018). Utilization of wood and bark of fast-growing hardwood species in energy production. *Journal of Forest Science*, 64(4), 164-170. <https://doi.org/10.17221/141/2017-JFS>
- Kang, K., Qiu, L., Sun, G., Zhu, M., Yang, X., Yao, Y., & Sun, R. (2019). Codensification technology as a critical strategy for energy recovery from biomass and other resources- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109414>
- Kang, K., Qiu, L., Zhu, M., Sun, G., Wang, Y., & Sun, R. (2018). Codensification of agroforestry residue with bio-oil for improved fuel pellets. *Energy & Fuels*, 32(1), 598-606. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03482>
- Kataki, R., & Konwer, D. (2002). Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy*, 22(6), 433-437. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00026-0)
- Kenney, K. L., Smith, W. A., Gresham, G. L., & Westover, T. L. (2013). Understanding biomass feedstock variability. *Biofuels*, 4(1), 111-127. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.83>
- Kibet, J., Khachatryan, L., & Dellinger, B. (2012). Molecular products and radicals from pyrolysis of lignin. *Environmental Science & Technology*, 46(23), 12994-13001. <https://doi.org/10.1021/es302942c>
- Kim, H. S., Kim, S., Kim, H. J., & Yang, H. S. (2006). Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochimica Acta*, 451(1-2), 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.09.013>
- Klasnja, B., Kopitovic, S., & Orlovic, S. (2002). Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass and Bioenergy*, 23(6), 427-432. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00069-7)

- Klemm, D., Philipp, B., Heinze, T., Heinze, U., & Wagenknecht, W. (1998). *Comprehensive Cellulose Chemistry: Fundamentals and Analytical Methods. 1*, 263. Wiley-VCH, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/3527601929>
- Klemm, M., Schmersahl, R., Kirsten, C., Weller, N., Pollex, A., Arti, J.H. & Zeng, T. (2019) Upgraded “New” Solid Biofuels. En: Kaltschmitt M. (eds). *Energy from Organic Materials (Biomass)* (pp. 451-481). Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7\\_247](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_247)
- Kreil, K., & Broekema, S. (2010). *Chemical and heat value characterization of perennial herbaceous biomass mixtures*. Analysis report. Microbeam Technologies. North Dakota, USA.
- Kocer, A., & Kurklu, A. (2020). Production of pellets from pruning residues and determination of pelleting physical properties. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1752857>
- Kocsis, Z., & Csanády, E. (2019). *Theory and Practice of Wood Pellet Production*. Springer. 118p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26179-5>
- Koppejan, J., & van Loo, S. (2007). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing* (1st ed.). *Routledge*. <https://doi.org/10.4324/9781849773041>
- Kougioumtzis, M. A., Kanaveli, I. P., Karampinis, E., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2021). Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. *Renewable Energy*, 171, 516-525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>
- Krigstin, S., & Wetzel, S. (2016). A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. *Fuel*, 175, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.014>
- Kuchler, C., Kuptz, D., Rist, E., Mack, R., Schön, C., Zimmermann, D., ... & Hartmann, H. (2019). *Contamination of wood pellets with selected mineral soils–fuel quality and combustion behaviour*. Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal (pp. 673-680). Accesado el 28 de noviembre de 2021 en: <https://www.researchgate.net/publication/335022926>
- Kuranc, A., Stoma, M., Rydzak, L., & Pilipiuk, M. (2020). Durability Assessment of Wooden Pellets in Relation with Vibrations Occurring in a Logistic Process of the Final Product. *Energies*, 13(22), 5890. <https://doi.org/10.3390/en13225890>
- Lamers, P., Tan, E. C., Searcy, E. M., Scarlata, C. J., Cafferty, K. G., & Jacobson, J. J. (2015). Strategic supply system design—a holistic evaluation of operational and production cost for a biorefinery supply chain. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(6), 648-660. <https://doi.org/10.1002/bbb.1575>
- Larsson, S. H., Agar, D. A., Rudolfsson, M., da Silva Perez, D., Campargue, M., Kalén, G., & Thyrel, M. (2021). Using the macromolecular composition to predict process settings that give high pellet durability in ring-die biomass pellet production. *Fuel*, 283, 119267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119267>
- Lavergne, S., Larsson, S. H., Perez, D. D. S., Marchand, M., Campargue, M., & Dupont, C. (2021). Effect of process parameters and biomass composition on flat-die pellet production from underexploited forest and agricultural biomass. *Fuel*, 302, 121076. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121076>

- Lewis, N. G., & Yamamoto, E. (1990). Lignin: occurrence, biogenesis and biodegradation. *Annual Review of Plant Biology*, 41(1), 455-496. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.41.060190.002323>
- López, D. (2013). Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos. [Tesis de Doctorado, Universidad de Castilla-La Mancha]. Accesado el 15 de noviembre de 2021 en: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/3393>
- López-Sosa, L. B., Núñez-González, J., Beltrán, A., Morales-Máximo, M., Morales-Sánchez, M., Serrano-Medrano, M., & García, C. A. (2019). A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer. *Sustainability*, 11(20), 5620. <https://doi.org/10.3390/su11205620>
- Lv, G., & Wu, S. (2012). Analytical pyrolysis studies of corn stalk and its three main components by TG-MS and Py-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.04.010>
- Maitra, S. & Maitra, K. (2020). Chemistry of Bioproducts. En: Mitra, M. & Nagchaudhuri, A. (eds). *Practices and Perspectives in Sustainable Bioenergy* (pp. 233-267). Green Energy and Technology. Springer, New Delhi. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-3965-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-81-322-3965-9_11)
- Manickam, I. N., Ravindran, D., & Subramanian, P. (2006). Biomass densification methods and mechanism. *Cogeneration and Distributed Generation Journal*, 21(4), 33-45. <https://doi.org/10.1080/15453660609509098>
- Marcotte, S., Castilla, C., Morin, C., Merlet-Machour, N., Carrasco-Cabrera, L., Medaerts, F., ... & Afonso, C. (2020). Particulate inorganic salts and trace element emissions of a domestic boiler fed with five commercial brands of wood pellets. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18221-18231. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08329-8>
- Martínez-Bravo, R. D., y Masera, O. (2020). Perspectivas de disminución de emisiones de carbono en México por el uso de la bioenergía: panorama actual. *Elementos para Políticas Públicas*, 4(1), 27-42. Accesado el 30 de enero de 2022 en: <http://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/28/26>
- Martínez-Guido, S. I., Ríos-Badrán, I. M., Gutiérrez-Antonio, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable energy*, 130, 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.084>
- Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Apolinar-Cortes, J., López-Miranda, J., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2012). Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 375-384. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.05.039>
- Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Orihuela-Equihua, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. *Wood Research*, 60(2), 281-292. ISBN: 1336-4561
- Masera, O., Coralli, F., García-Bustamante, C., Riegelhaupt, E., Arias Chalico, T., Vega Gregg, J., ... & Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México: situación actual y perspectivas. Cuaderno temático No. 4. *Red Mexicana de Bioenergía*. Accesado el 12 de julio de 2021 en: <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf>
- Mediavilla, I., Esteban, L. S., & Fernández, M. J. (2012). Optimisation of pelletisation conditions for poplar energy crop. *Fuel Processing Technology*, 104, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.031>

- Medina, L. E., & Medina, I. N. (2018). Mobile autothermic prototype for biochar production using biomass of avocado crop byproducts. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Meincken, M. & Tyhoda L. (2014). Biomass Quality. En: Seifert T. (eds). *Bioenergy from Wood* (pp. 169-187). Managing Forest Ecosystems, vol. 26. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7448-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7448-3_8)
- Miles, P. D. (2009). Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America. Note NRS-38. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 35 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RN-38>
- Miles, T. R., Miles Jr, T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M., & Oden, L. L. (1996). Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, 10(2-3), 125-138. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00067-4)
- Mladenović, M., Paprika, M., & Marinković, A. (2018). Denitrification techniques for biomass combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3350-3364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.054>
- Mohtasham, J. (2015). Renewable energies. *Energy Procedia*, 74, 1289-1297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774>
- Mondragón-Valero, A., Velázquez-Martí, B., Salazar, D. M., & López-Cortés, I. (2018). Influence of Fertilization and Rootstocks in the Biomass Energy Characterization of *Prunus dulcis* (Miller). *Energies*, 11(5), 1189. <https://doi.org/10.3390/en11051189>
- Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of *Pinus* spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in Mexico. *Forests*, 12(8), 977. <https://doi.org/10.3390/f12080977>
- Mostafa, M. E., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S. A., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 332-348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>
- Nogués, F. S., García-Galindo, D y Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa* (vol. I). Pressas Universitarias de Zaragoza. 557p. ISBN: 97884-92774-91-3
- Nosek, R., Holubcik, M., & Jandacka, J. (2016). The impact of bark content of wood biomass on biofuel properties. *BioResources*, 11(1), 44-53. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.44-53>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2014). Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 127, 135-140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.042>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053>
- Nunes, L. J., Loureiro, L. M., Sá, L. C., Matias, J. C., Ferraz, A. I., & Rodrigues, A. C. (2021). Energy Recovery of Agricultural Residues: Incorporation of Vine Pruning in the Production of Biomass Pellets with *ENplus*® Certification. *Recycling*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/recycling6020028>

- Obernberger, I. (1998). Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen: unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. (Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung; Vol. 1). Dbv-Verlag. 350p. ISBN: 3-7041-0241-5
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). The pellet handbook: the production and thermal utilisation of pellets. *Routledge*. <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973-982. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- Olsson, M., & Kjällstrand, J. (2004). Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 607-611. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.018>
- Orémusová, E., Tereňová, L., & Réh, R. (2014). Evaluation of the gross and net calorific value of the selected wood species. *Advanced Materials Research*, 1001, 292-299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.292>
- Órfão, J. J. M., & Figueiredo, J. L. (2001). A simplified method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments. *Thermochimica Acta*, 380(1), 67-78. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(01\)00634-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(01)00634-7)
- Órfão, J. J. M., Antunes, F. J. A. & Figueiredo, J. L. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. *Fuel* 78(3): 349-358. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00156-2)
- Ortuño, Á. V. (1999). Introducción a la química industrial. Reverté. España. ISBN: 978- 84-291-7933-0
- Oyededeji, O., Gitman, P., Qu, J., & Webb, E. (2020). Understanding the impact of lignocellulosic biomass variability on the size reduction process: A review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(6), 2327-2343. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06698>
- Paniagua, S., Reyes, S., Lima, F., Pilipenko, N., & Calvo, L. F. (2021). Combustion of avocado crop residues: Effect of crop variety and nature of nutrients. *Fuel*, 291, 119660. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119660>
- Parker, R., & Ring, S. G. (2001). Aspects of the physical chemistry of starch. *Journal of Cereal Science*, 34(1), 1-17. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0402>
- PEMEX (2022). Estadísticas petroleras: Precio al público de productos petrolíferos. Accesado el 13 de marzo de 2022 en: [https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/epublico\\_esp.pdf](https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/epublico_esp.pdf)
- Peng, J., Wang, J., Bi, X. T., Lim, C. J., Sokhansanj, S., Peng, H., & Jia, D. (2015). Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Processing Technology*, 129, 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.010>
- Peng, Y., & Wu, S. (2010). The structural and thermal characteristics of wheat straw hemicellulose. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 88(2), 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.03.006>
- Perea-Moreno, A. J., Aguilera-Ureña, M. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2016). Fuel properties of avocado stone. *Fuel*, 186, 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.101>
- Pereira, H., Graça, J. & Rodríguez, J.C. (2003). Wood chemistry in relation to quality. En: Barnett, J.R. & Jeronimidis, G. (eds). *Wood quality and its biological basis* (pp. 53-83). Blackwell Publishing, Oxford, UK. ISBN: 1-84127-319-8

- Pérez, S., Ávila, G. & Coto, O. (2015). El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos tropicales*, 36(2), 11-123. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19879.55200>
- Pérez-Arévalo, J. J., Callejón-Ferre, A. J., Velázquez-Martí, B., & Suárez-Medina, M. D. (2015). Prediction models based on higher heating value from the elemental analysis of neem, mango, avocado, banana, and carob trees in Guayas (Ecuador). *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(5), 053122. <https://doi.org/10.1063/1.4934593>
- Pettersen, R.C., (1984). The chemical composition of wood (Cap. 2). En: Rowell, R.M., (Ed), *The chemistry of solid wood, Advances in Chemistry Series* (pp. 57-126). American Chemical Society, Washintong, DC. <https://doi.org/10.1021/ba-1984-0207.ch002>
- Picchi, G., Lombardini, C., Pari, L., & Spinelli, R. (2018). Physical and chemical characteristics of renewable fuel obtained from pruning residues. *Journal of Cleaner Production*, 171, 457-463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.025>
- Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., & Pari, L. (2020). Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. *Energies*, 13(11), 2937. <https://doi.org/10.3390/en13112937>
- Pietsch, W. (1997). Size Enlargement by Agglomeration. En: Fayed M.E. & Otten, L. (eds). *Handbook of Powder Science & Technology* (pp. 202-377). Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0_6)
- Pollex, A., Zeng, T., Khalsa, J., Erler, U., Schmersahl, R., Schön, C., ... & Nelles, M. (2018). Content of potassium and other aerosol forming elements in commercially available wood pellet batches. *Fuel*, 232, 384-394. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.001>
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., Ngangyo-Heya, M., & Carrillo-Parra, A. (2021). Assessment of Pellets from Three Forest Species: From Raw Material to End Use. *Forests*, 12(4), 447. <https://doi.org/10.3390/f12040447>
- Ramezanzade, M., & Moghaddam, A. G. (2018). Optimizing the production parameters for pellets made from pistachio tree pruning using multi-response optimization. *Waste and biomass valorization*, 9(7), 1213-1221. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9840-1>
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J. J., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., ... & Rutiaga-Quñones, J. G. (2022). Evaluation of Selected Physical and Thermal Properties of Briquette Hardwood Biomass Biofuel. *BioEnergy Research*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Rebbling, A., Näzelius, I. L., Schwabl, M., Feldmeier, S., Schön, C., Dahl, J., ... & Boman, C. (2020). Prediction of slag related problems during fixed bed combustion of biomass by application of a multivariate statistical approach on fuel properties and burner technology. *Biomass and Bioenergy*, 137, 105557. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105557>
- Rhén, C. (2004). Chemical composition and gross calorific value of the above-ground biomass components of young *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(1), 72-81. <https://doi.org/10.1080/02827580310019185>
- Richards, S.R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, 25(2), 89-100. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(90\)90098-D](https://doi.org/10.1016/0378-3820(90)90098-D)

- Rincón-Hernández, C. A., Sánchez Pérez, J. D. L. L., & Espinosa-García, F. J. (2011). Foliar chemical characterization of the creole avocado trees (*Persea americana* var. *drymifolia*) in the germplasm banks from Michoacan, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(2), 395-412. Accedido el 22 de diciembre de 2021 en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-34532011000200004&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-34532011000200004&script=sci_abstract&tlng=en)
- Rocha, S., Candia, O., Valdebenito, F., Espinoza-Monje, J. F., & Azócar, L. (2020). Biomass quality index: Searching for suitable biomass as an energy source in Chile. *Fuel*, 264, 116820. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116820>
- Rodríguez, J. L., Álvarez, X., Valero, E., Ortiz, L., de la Torre-Rodríguez, N., & Acuña-Alonso, C. (2021). Influence of ashes in the use of forest biomass as source of energy. *Fuel*, 283, 119256. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119256>
- Rotz, L. & Giazzi, G. (2012). Characterization of pharmaceutical products by the c. Thermo Fischer Scientific, Milan, Italy. Accedido el 17 de enero de 2022 en: [https://www.brechbuehler.ch/fileadmin/redacteur/pdf/oea/FLASHSmart/app-notes/AN42192\\_Characterization\\_of\\_pharmaceutical\\_products\\_by\\_the\\_Thermo\\_Scientific\\_FLASH\\_2000\\_Elemental\\_Analyzer.pdf](https://www.brechbuehler.ch/fileadmin/redacteur/pdf/oea/FLASHSmart/app-notes/AN42192_Characterization_of_pharmaceutical_products_by_the_Thermo_Scientific_FLASH_2000_Elemental_Analyzer.pdf)
- Rowell, R. M. (Ed.). (2005). Chemistry of Wood Strength. En: *Handbook of wood chemistry and wood composites* (Cap. 11). CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780203492437>
- Ruíz-Carmona, O., Islas-Samperio, J. M., Larrondo-Posadas, L., Manzini, F., Grande-Acosta, G. K., & Álvarez-Escobedo, C. (2021). Solid Biofuels Scenarios from Rural Agricultural and Forestry Residues for Mexican Industrial SMEs. *Energies*, 14(20), 6560. <https://doi.org/10.3390/en14206560>
- Ruiz-García, V. M., Huerta-Mendez, M. Y., Vázquez-Tinoco, J. C., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., López-Albarrán, P., ... & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Pellets from Lignocellulosic Material Obtained from Pruning Guava Trees: Characterization, Energy Performance and Emissions. *Sustainability*, 14(3), 1336. <https://doi.org/10.3390/su14031336>
- Rutiaga-Quiñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., Gonzalez-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., ... & Lujan-Alvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4), 8529. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Saka, S. (1993). Structure and chemical composition of wood as a natural composite material. *Recent Research on Wood and Wood-Based Materials*. 1-20. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-7821-9.50007-1>
- Sakai, K. (2000). Chemistry of bark. En: Hon, D., & Shiraishi, N. (Eds). *Wood and Cellulosic Chemistry*, (2<sup>nd</sup> ed.) (pp. 243-273). CRC Press. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781482269741>
- 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>
- Sánchez-Pérez, J. (1999). Recursos genéticos de aguacate (*Persea americana* Mill.) y especies afines en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 7-18. [http://209.143.153.251/WAC4/WAC4\\_p007.pdf](http://209.143.153.251/WAC4/WAC4_p007.pdf)
- Schlesinger, R. B., & Lippmann, M. (2020). Nitrogen oxides. En: Lippmann, M. & Leikauf, G. *Environmental toxicants: human exposures and their health effects*, 721-781. <https://doi.org/10.1002/9781119438922.ch20>

- Schmidhuber, J. & Tubiello, F.N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50):19703–19708. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701976104>
- Selvarajoo, A., Lee, C. W., Oochit, D., & Almashjary, K. H. O. (2021). Bio-pellets from empty fruit bunch and durian rinds with cornstarch adhesive for potential renewable energy. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.06.008>
- Shebani, A. N., Van Reenen, A. J., & Meincken, M. (2008). The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*, 471(1-2), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.02.020>
- SIAP (2021a). Avance de Siembras y Cosechas: Resumen nacional por estado, perennes, noviembre de 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Accesado el 27 de diciembre de 2021 en: [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- SIAP. (2021b). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Accesado el 27 de diciembre de 2021 en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/687057/Escenario\\_aguacate\\_nov21.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/687057/Escenario_aguacate_nov21.pdf)
- Silva-Guzmán, J. A., Fuentes-Talavera, F. J., Richter, H. G., Ángeles-Álvarez, G., & Sanjuan-Dueñas, R. (1999). Estructura de la madera de *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill (Hass). *Madera y Bosques*, 5(1), 53-59. Accesado el 15 de noviembre de 2021 en: <https://doi.org/10.21829/myb.1999.511354>
- Silva-Guzmán, J. A. (2008). *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México* (Tomo II). Coordinación, Educación y Desarrollo Tecnológico. CONAFOR. 132p. Accesado el 24 de octubre de 2021 en: <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/catalogo-maderas-tomo2.pdf>
- Simoneit, B. R., Schauer, J. J., Nolte, C. G., Oros, D. R., Elias, V. O., Fraser, M. P., ... & Cass, G. R. (1999). Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles. *Atmospheric Environment*, 33(2), 173-182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00145-9)
- Sirignano, W. A. (1986). Combustion fundamentals. *Combustion and Flame*, 6(1-2), 309. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(86\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90132-X)
- Solano, A.U. y Mendoza, C.A. (2014). Caracterización de los residuos de cultivos agrícolas de aguacate, arracacha, frijol, guayaba y piña producidos en Santander, Colombia. [Tesis de licenciatura, Universidad Industrial de Santander]. Santander, Colombia. [http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa\\_detalle\\_matbib\\_N.jsp?parametros=167146%20752963](http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib_N.jsp?parametros=167146%20752963)
- Soria-González, J.A. (2019). Estudio del potencial biomásico de residuos de poda del árbol de aguacate para la producción de biocombustibles sólidos en el municipio de Salvador Escalante Michoacán. [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Morelia]. Michoacán, México.
- Ståhl, M., Berghel, J., Frodeson, S., Granström, K., & Renström, R. (2012). Effects on pellet properties and energy use when starch is added in the wood-fuel pelletizing process. *Energy & Fuels*, 26(3), 1937-1945. <https://doi.org/10.1021/ef201968r>
- Stelte, W., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on

- the processing conditions. *Fuel* 90(11). 3285-3290.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>
- Stevanovic, T., & Perrin, D. (2009). *Chimie du bois*. Presses polytechniques et universitaire romandes. 242p. ISBN: 978-2-88074-799-2.
- Su, P., Granholm, K., Pranovich, A., Harju, L., Holmbom, B., & Ivaska, A. (2012). Metal ion sorption to birch and spruce wood. *BioResources*, 7(2), 2141-2155.  
<https://doi.org/10.15376/biores.7.2.2141-2155>
- Szemmelveisz, K., Szűcs, I., Palotás, Á. B., Winkler, L., & Eddings, E. G. (2009). Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass. *Fuel Processing Technology*, 90(6), 839-847. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.03.001>
- Tarasov, D., Shahi, C., & Leitch, M. (2013). Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: A review. *International Scholarly Research Notices*, 13, 1-6.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/876939>
- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., & Maser, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 380-389.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- Tauro, R., Velázquez-Martí, B., Manrique, S., Ricker, M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., ... & Armendáriz-Arnez, C. (2022). Potential Use of Pruning Residues from Avocado Trees as Energy Input in Rural Communities. *Energies*, 15(5), 1715.  
<https://doi.org/10.3390/en15051715>
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1663-1667.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.038>
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964-972. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.008>
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., & Valaert, J. (2015). Calidad de pellets elaborados a partir de cultivos agrícolas y forestales en climas tropicales costarricenses. *BioRecursos*, 10 (1), 482-498. <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.482-498>
- Thiffault, E., Barrette, J., Blanchet, P., Nguyen, Q. N., & Adjalle, K. (2019). Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues. *Forests*, 10(7), 607.  
<https://doi.org/10.3390/f10070607>
- Torvela, T., Uski, O., Karhunen, T., Lähde, A., Jalava, P., Sippula, O., ... & Jokiniemi, J. (2014). Reference particles for toxicological studies of wood combustion: formation, characteristics, and toxicity compared to those of real wood combustion particulate mass. *Chemical Research in Toxicology*, 27(9), 1516-1527.  
<https://doi.org/10.1021/tx500142f>
- Toscano, G., Alfano, V., Scarfone, A., & Pari, L. (2018). Pelleting vineyard pruning at low cost with a mobile technology. *Energies*, 11(9), 2477. <https://doi.org/10.3390/en11092477>
- Toscano, G., Duca, D., Rossini, G., Mengarelli, C., & Pizzi, A. (2015). Identification of different woody biomass for energy purpose by means of soft independent modeling of class analogy applied to thermogravimetric analysis. *Energy*, 83, 351-357.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.032>
- Toscano, G., Riva, G., Pedretti, E. F., Corinaldesi, F., Mengarelli, C., & Duca, D. (2013). Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most

- important chemical elements. *Biomass and Bioenergy*, 56, 317-322. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.012>
- Tovar, T. (2008). Caracterización morfológica y térmica de almidón de maíz (*Zea mays* L) por diferentes métodos de aislamiento. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Pachuca de Soto, Hidalgo, México. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/508>
- Tumuluru, J. S. (2015). High moisture corn stover pelleting in a flat die pellet mill fitted with a 6 mm die: physical properties and specific energy consumption. *Energy Science & Engineering*, 3(4), 327-341. <https://doi.org/10.1002/ese3.74>
- Tumuluru, J. S., Hess, J. R., Boardman, R. D., Wright, C. T., & Westover, T. L. (2012). Formulation, pretreatment, and densification options to improve biomass specifications for co-firing high percentages with coal. *Industrial Biotechnology*, 8(3), 113-132. <https://doi.org/10.1089/ind.2012.0004>
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenny, K.L. & Hess, J.R. (2010). A review on biomass densification technologies for energy application (No. INL/EXT-10-18420). Idaho National Laboratory (INL). Accesado el 15 de diciembre de 2021 en: <https://sswm.info/node/12470>
- Tumuluru, J.S. (2020). *Biomass Densification: Systems, Particle Binding, Process Conditions, Quality Attributes, Conversion Performance, and International Standards*. Springer, Cham. 191p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62888-8>
- Uski, O., Jalava, P. I., Happonen, M. S., Torvela, T., Leskinen, J., Mäki-Paakkanen, J., ... & Hirvonen, M. R. (2015). Effect of fuel zinc content on toxicological responses of particulate matter from pellet combustion in vitro. *Science of the Total Environment*, 511, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.061>
- Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., & Boerjan, W. (2010). Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology*, 153(3), 895-905. <https://doi.org/10.1104/pp.110.155119>
- Vasileiadou, A., Zoras, S., & Iordanidis, A. (2021). Fuel Quality Index and Fuel Quality Label: Two versatile tools for the objective evaluation of biomass/wastes with application in sustainable energy practices. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101739. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101739>
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., & Vassilev, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 158, 330-350. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.050>
- Vega-Nieva, D. J., García-Maraver, A., & Ortiz, L. (2015). Slagging and fouling risks derived from the combustion of solid biofuels. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 85, 137-147. <https://doi.org/10.2495/978-1-84566-062-8/008>
- Velázquez, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Editorial Universitat Politècnica de València. Valencia, España. ISBN: 978-84-9048-675-7
- Velázquez-Martí, B., López-Cortés, I., Salazar-Hernández, D. & Callejón-Ferre, Á.J. (2017). Modeling the Calorific Value of Biomass from Fruit Trees Using Elemental Analysis Data. En: Tumuluru, J.S. (ed). *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*. IntechOpen: London, UK. <https://doi.org/10.5772/65276>
- Voca, N., Bilandzija, N., Jurisic, V., Matin, A., Kricka, T., & Sedak, I. (2016). Proximate, Ultimate, and Energy Values Analysis of Plum Biomass By-products Case Study:

- Croatia's Potential. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(6), 1655-1666. Accesado el 12 de enero de 2022 en: <http://jast.modares.ac.ir/article-23-11653-en.html>
- Vu, B., Alves, C. A., Gonçalves, C., Pio, C., Gonçalves, F., & Pereira, R. (2012). Mutagenicity assessment of aerosols in emissions from wood combustion in Portugal. *Environmental pollution*, 166, 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.005>
- Wang, L., Barta-Rajnai, E., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Czégény, Z., Jakab, E., ... & Grønli, M. (2018). Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood, stump and bark. *Applied Energy*, 227, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.024>
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T., & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in energy and combustion science*, 26(1), 1-27. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00005-2)
- White, R. H. (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science*, 19(4), 446-452. Accesado el 22 de diciembre de 2021 en: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/721>
- Winzer, F., Kraska, T., Elsenberger, C., Kötter, T., & Pude, R. (2017). Biomass from fruit trees for combined energy and food production. *Biomass and Bioenergy*, 107, 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.027>
- Woo, D. G., Kim, S. H., & Kim, T. H. (2021). Solid Fuel Characteristics of Pellets Comprising Spent Coffee Grounds and Wood Powder. *Energies*, 14(2), 371. <https://doi.org/10.3390/en14020371>
- World Health Organization. (1997). Nitrogen Oxides -Environmental Health Criteria 188 (2nd ed.) World Health Organization, Geneva. Accesado el 20 de febrero de 2022 en: <https://stg-wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29545/EHC188Nitrogen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Xing, C., Zhang, S. Y., Deng, J., & Wang, S. (2007). Investigation of the effects of bark fiber as core material and its resin content on three-layer MDF performance by response surface methodology. *Wood Science and Technology*, 41(7), 585-595. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0129-6>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Zheng, C., Lee, D. H., & Liang, D. T. (2006). In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy & Fuels*, 20(1), 388-393. <https://doi.org/10.1021/ef0580117>
- Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Lee, H.; Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86(12-13): 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołębowski, W., & Szczepanik, M. (2018). Chemical characteristics of biomass ashes. *Energies*, 11(11), 2885. <https://doi.org/10.3390/en11112885>
- Zanetti, M., Brandelet, B., Marini, D., Sgarbossa, A., Giorio, C., Badocco, D., ... & Cavalli, R. (2017). Vineyard pruning residues pellets for use in domestic appliances: a quality assessment according to the EN ISO 17225. *Journal of Agricultural Engineering*, 48(2), 99-108. <https://doi.org/10.4081/jae.2017.612>
- Zanetti, M., Cesprini, E., Marangon, M., Szczurek, A., & Tondi, G. (2021). Thermal valorization and elemental composition of industrial tannin extracts. *Fuel*, 289, 119907. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119907>
- Zavala, M., Molina, L. T., Maiz, P., Monsivais, I., Chow, J. C., Watson, J. G., ... & Knighton, W. B. (2018). Black carbon, organic carbon, and co-pollutant emissions and energy

efficiency from artisanal brick production in Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(8), 6023-6037. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6023-2018>


Zhang, M., Buekens, A., & Li, X. (2016). Dioxins from biomass combustion: an overview. *Waste and Biomass Valorization*, 8(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9744-5>

## 12. Anexo

Características del equipo de molienda y peletizado utilizados en el estudio.


**Tabla 1**

*Equipo de molienda utilizado en el proceso de peletizado.*

Equipo	Potencia nominal	Alimentación eléctrica	rpm
Molino de disco y martillos 	7.5 kW $\approx$ 10 hp	220 V	1440

**Tabla 2**

*Equipo de peletizado utilizado en el proceso.*

Equipo	Potencia nominal	Alimentación eléctrica	Capacidad
Peletizadora de alimentos Meelco co, tipo ZLSP200C (Meelco, Florida, USA) 	7.5 kW $\approx$ 10 hp	230/400 V (trifásica)	80 – 120 kg/h