

Aprovechamiento de la semilla de palta Hass (*Persea americana*) por pirólisis rápida y su evaluación en el rendimiento de obtención de bio-oil y biochar

MANUEL ANTONIO FLORES IZQUIERDO ¹

RECIBIDO: 24/05/2023 ACEPTADO: 19/07/2023 PUBLICADO: 15/12/2023

RESUMEN

En este estudio se investiga el uso de residuos de la agroindustria de exportación en el Perú, específicamente de la semilla de palta Hass, en el proceso de pirólisis para obtener bio-oil y biochar. El proceso se lleva a cabo en un reactor tubular al vacío a una velocidad de calentamiento de 8.4°C/min, con un tamaño de partícula inferior a 2 mm, a temperaturas de 300°C, 400°C y 500°C por un periodo de tres horas y tres réplicas. Los hallazgos sugieren que la temperatura influye significativamente en el rendimiento del bio-oil y del biochar. Los resultados muestran que el mayor rendimiento de bio-oil (46.47%) se obtiene a 500°C, mientras que el mayor rendimiento de biochar (45.33%) se obtiene a 300°C. Además, se ha demostrado con un valor de significación estadística ($p < 0.05$) que existe una variación notable en el rendimiento entre el bio-oil y el biochar, y también entre los rendimientos a diferentes temperaturas.

Palabras clave: semilla de palta; residuo agroindustrial; industrialización; termoquímica; pirólisis de biomasa.

INTRODUCCIÓN

A medida que aumentan las exportaciones peruanas, se generan cada vez más subproductos y residuos propios de los procesos en campo y planta, y miles de toneladas son desechadas cada año, lo que genera una pérdida económica para las empresas y a la vez contamina el medio ambiente.

La agroindustria de la palta o aguacate produce una gran cantidad de desechos, tales como la cáscara y la semilla, que pueden ser procesados para obtener productos de alto valor agregado para la industria. Este proceso puede llevarse a través de la biorrefinería, que combina procesos de transformación de biomasa para la producción de una serie de productos. Entre dichos productos se encuentran las biomoléculas, los biomateriales, la bioenergía y los biocombustibles (Dávila et al., 2017). La industria del aguacate produce enormes cantidades de subproductos y representa una importante fuente de materia prima para aplicaciones energéticas y la producción de materiales carbonosos de gran importancia para reducir la contaminación ambiental del agua (Colombo y Papetti, 2019).

Martinez et al. (2021) sostienen que los residuos agroindustriales pueden convertirse en nuevos productos mediante procesos termoquímicos y biológicos; la pirólisis y la gasificación son procesos termoquímicos. El uso de la biomasa agroindustrial de aguacate presenta un potencial significativo para la producción comercial de carbón vegetal y combustibles líquidos mediante torrefacción y pirólisis (Lara et al., 2018). La biomasa residual producida en el sector de la palta resulta de la gran cantidad de fabricantes de palta que generan subproductos potencialmente aptos para producir energía térmica (Perea et al., 2016).

La importancia de este estudio radica en que pretende dar una alternativa de industrialización a las miles de toneladas de semillas de aguacate que se desechan como parte del proceso

¹ Ingeniero agroindustrial, magíster en Administración de Negocios Globales por la PUCP y magíster Scientiae en Agronegocios por la Universidad Nacional Agraria La Molina-UNALM (Lima, Perú). Actualmente, es profesor de Ingeniería en Gestión Empresarial de la UNALM y consultor internacional de Ingeniería y Proyectos.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0626-9943>

Autor de correspondencia: mfloresi@fimaagroindustry.com

de congelado de palta en el Perú para obtener biocombustibles como bio-oil y biochar, los cuales tienen aplicaciones energéticas y pueden contribuir a que la agroindustria sea sostenible en el tiempo.

El tema tratado en la presente investigación es el punto de partida para dar una alternativa industrial para el aprovechamiento de la biomasa residual de la agroindustria de la palta en la producción de bioenergía. Es necesario profundizar en la investigación del análisis químico de los productos resultantes de la pirólisis, así como en el escalamiento industrial para evaluar la viabilidad técnico-económica para su ejecución en el país.

En tal sentido, el objetivo de esta investigación es analizar la influencia de la temperatura de pirólisis de la semilla de palta Hass en el rendimiento de bio-oil y biochar, para aprovechar los subproductos del proceso de congelado de palta de la agroindustria peruana. Por otra parte, el uso de estos residuos contribuiría a reducir la contaminación ambiental.

La hipótesis general sostiene que el rendimiento de bio-oil y biochar a partir de la semilla de aguacate es igual. La hipótesis específica sostiene que el rendimiento es el mismo a temperaturas de 300°C, 400°C y 500°C.

MARCO TEÓRICO

Los subproductos agroindustriales incluyen principalmente las cáscaras, semillas, tallos, el bagazo, los granos y la cascarilla. Debido a su sobreproducción y a la falta de una gestión sostenible, estos subproductos son desechados en vertederos, lo que genera problemas ambientales, sociales y económicos (Gómez et al., 2021). Sin embargo, la utilización de residuos de cultivos para la generación de energía ha contribuido en parte a resolver las prácticas inadecuadas de su manejo, en consecuencia, ha reducido su impacto medioambiental. Los residuos de cultivos son materiales celulósicos con alto contenido de carbono fijo que podrían ser una fuente de materia prima para la generación de energía y contribuir significativamente al secuestro de carbono en el suelo, al mantenimiento de la calidad del suelo y a las funciones ecosistémicas; por ello, necesitan ser evaluados de forma crítica y objetiva (Prasad et al., 2020).

Debido a su abundancia, la energía de biomasa se ha convertido en la cuarta fuente de energía, tras el carbón, el petróleo y el gas natural. En la actualidad, el bio-oil y el biochar son los principales productos de la pirólisis de biomasa para aplicaciones. A pesar de ello, los productos de la biomasa siguen

teniendo un potencial sin explotar que merece mayor exploración (Zhang et al., 2023). Por su parte, García et al. (2023) afirman que las semillas y cáscaras de aguacate no tienen uso industrial específico, y que se requieren varias vías de valorización para obtener productos de alto valor añadido que permitan cerrar el círculo e incrementar la sostenibilidad de la cadena de valor del aguacate. Asimismo, Dyjakon et al. (2022) afirman que las semillas de frutas exóticas, como el aguacate y mango, pueden utilizarse para producir energía mediante el método de valorización de torrefacción a temperaturas que oscilan entre 200°C y 300°C.

De la transformación del aguacate, se obtienen semillas y cáscaras. Las semillas contienen entre 15% y 16% del peso del fruto, son óptimas fuentes de fibra y poseen una composición de gran valor, que incluye polifenoles y antioxidantes (Barbosa et al., 2016).

Domínguez et al. (2014) afirman que solo la pulpa de aguacate se utiliza para aplicaciones comerciales, mientras que otras partes del fruto no tienen utilidad práctica y se desechan en vertederos. El aguacate se produce en plantas centralizadas de procesamiento; las semillas pueden representar hasta el 26% del peso del fruto. A pesar de su alto contenido de almidón, las semillas no pueden utilizarse como alimento para ganado debido a su alta concentración de polifenoles que le confieren un sabor amargo y pueden ser tóxicos en grandes cantidades.

Martín y Calero (2020) definen la pirólisis como un proceso termoquímico en el que la materia orgánica, como la que se encuentra en la biomasa, se descompone térmicamente liberando energía en forma de calor en una atmósfera inerte o al vacío. Asimismo, definen la torrefacción como un proceso termoquímico realizado a temperaturas que oscilan entre 200°C y 300°C cuya finalidad es convertir la biomasa en un combustible sólido de calidad superior. En su estudio, Fabbri et al. (2021) afirman que la pirólisis puede ser considerada una tecnología «verde», debido a su simplicidad y a la ausencia de reactivos químicos, que tiene futuro.

El biochar es un producto muy valioso que se obtiene por medio de las tecnologías de conversión termoquímica. Su rendimiento y propiedades varían enormemente según el tipo de materia prima, la tecnología y las condiciones operativas utilizadas durante la producción. La tecnología de mayor éxito para la producción de biochar es la pirólisis lenta, que alcanza un rendimiento en peso entre 25% y 50%; el rendimiento puede superar el

70% dependiendo de la materia prima empleada. A diferencia de la pirólisis lenta, la pirólisis rápida proporciona mayores beneficios de obtención de bio-oil en un rango de 50% y 75% en peso, mientras que el rendimiento de biochar suele ser del 12% en peso de la materia prima (Safarin, 2023).

El poder calorífico es la cantidad de calor que emite un material por unidad de masa cuando se quema en condiciones específicas. A su vez, el poder calorífico superior (PCS) es el calor liberado cuando un material se quema en un recipiente cerrado, más el calor generado por la condensación del agua que se evapora. La presión es variable porque aumenta a medida que aumenta la cantidad de gases producidos por la combustión: CO_2 , N_2 , SO_2 y vapor de agua (Velásquez, 2018).

Posteriormente, Yarbay et al. (2020) realizaron un estudio sobre el proceso de pirólisis de la semilla de aguacate en un reactor Heinze a 500°C con una velocidad de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ y un tiempo de retención de 20 min. El experimento de pirólisis produjo producto líquido (32%), producto sólido «char» (34%) y gas no condensable (34%) con una conversión de biomasa del 67%. Con base en los resultados, se confirmó que la semilla de aguacate puede ser utilizada como un biorresiduo según los resultados de la pirólisis; sin embargo, es necesario realizar más evaluaciones para determinar las propiedades del producto líquido como aceite biocombustible y del producto sólido «char» como carbón activado.

En su estudio, Durak y Aysu (2014) realizaron la pirólisis lenta de semillas de aguacate en un reactor tubular de lecho fijo con (KOH , Al_2O_3), sin catalizador, a tres temperaturas que oscilaron entre 400°C y 600°C , con velocidades de calentamiento de $50^\circ\text{C}/\text{min}$. Los principales parámetros de pirólisis que influyeron en el rendimiento fueron la temperatura y los catalizadores. El mayor rendimiento líquido (37.5%) se obtuvo utilizando KOH al 10% como catalizador y una temperatura de 600°C con una velocidad de calentamiento de $50^\circ\text{C}/\text{min}$, empleando materia prima con un tamaño de partícula de 0.150 mm y un caudal de gas de barrido de $100 \text{ cm}^3/\text{min}$.

De acuerdo con la investigación de Nizami et al. (2017), el aceite líquido producido por procesos de biorrefinerías varía según la materia prima. Por ejemplo, la biomasa leñosa contiene aproximadamente 30% de agua, 30% de compuestos fenólicos, 30% de aldehídos, 20% de cetonas, 15% de alcoholes, etc. Además, por medio de un proceso de hidroxigenación (HDO), los bioaceites

podrían convertirse en hidrocarburos líquidos de características comparables a las del petróleo crudo.

El producto sólido de la pirólisis rápida, conocido como biochar, se compone principalmente de biocarbono, pero también contiene cenizas. El biochar representa entre el 12% y el 15% en peso de los productos de la pirólisis rápida (Brown y Wang, 2017). La composición elemental del bio-oil de biomasa contiene entre 35% y 45% de peso en oxígeno. Químicamente, los bioaceites contienen bastante agua, partículas sólidas y cientos de compuestos orgánicos, como ácidos, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles, ésteres, azúcares y furanos (Boateng, 2020). Asimismo, Mantilla et al. (2015) afirman que el bio-oil es una mezcla de casi 300 tipos de compuestos orgánicos, incluidos los fenoles que se producen durante el refinado del petróleo y suelen utilizarse como aditivos para combustibles, antioxidantes alimentarios y en la síntesis de otras sustancias químicas.

Sánchez et al. (2016) afirman que la mayor parte del bio-oil que se obtiene en la pirólisis a baja temperatura (300°C) contiene el 80.2% de agua, mientras que el 19.8% restante está formado por productos orgánicos que son los que aportan el valor energético a la fracción condensable. Asimismo, Aysu y Durak (2015) realizaron un proceso de licuefacción de la semilla de aguacate en un reactor a varias temperaturas y los bioaceites obtenidos a 270°C y 290°C fueron analizados utilizando técnicas de espectroscopía y cromatografía. Se constató que estos compuestos contienen distintas estructuras moleculares como monoaromáticos, alifáticos, compuestos oxigenados, compuestos nitrogenados y compuestos poliaromáticos y derivados. Entre los compuestos monoaromáticos se encontraron benceno, furanos y fenoles; entre los compuestos alifáticos, alcanos y alquenos; y entre los compuestos oxigenados, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos carboxílicos. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) realizada al bio-aceite obtenido reveló la presencia de fenoles, alcoholes, alcanos, alquenos, aldehídos, cetonas, etc.

En su trabajo de investigación, Caldeira et al. (2020) afirman que es necesario tener en cuenta varios aspectos para desarrollar procesos industriales sostenibles basados en la valorización de los residuos alimentarios. Entre ellos, la viabilidad técnica de los procesos a escala industrial, el análisis de su potencial socioeconómico y una evaluación medioambiental de los beneficios.

METODOLOGÍA

Tipo y diseño de la investigación

Esta es una investigación de enfoque cuantitativo y diseño experimental factorial de $2 \times 3 \times 3$. El primer factor es el producto y tiene dos niveles (bio-oil y biochar), mientras que el segundo factor es la temperatura y tiene tres niveles (300°C , 400°C y 500°C), con tres réplicas.

La investigación se realizó en el laboratorio de termoquímica de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en Lima, Perú. Los análisis físicos también se realizaron en dicha institución.

El análisis termogravimétrico (proximal) de la semilla de palta Hass se realizó en el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Para realizar la pirólisis rápida de la semilla de palta Hass, se utilizó el flujo de procesos (Figura 1) que se detalla a continuación:

- Recepción: Las muestras de palta Hass maduras fueron adquiridas en supermercados de la ciudad de Lima.
- Pelado/corte: La pulpa y la cáscara de la palta Hass fueron separadas y se conservaron solo las semillas.
- Secado: Las semillas fueron secadas en una estufa para reducir su humedad hasta 10%.
- Molienda: Las semillas fueron trituradas en un molino hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 2 mm.
- Tamizado: Las semillas trituradas fueron tamizadas hasta quedar solo partículas de tamaño inferior a 2 mm.
- Pirólisis: Las semillas secas y trituradas fueron colocadas en un reactor tubular de lecho fijo al vacío (a 67.461 kPa abs), a una velocidad de calentamiento constante de $8.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ por un periodo de 3 horas, y se calentó a 300°C , 400°C y 500°C , con una carga de 50 g de muestra en polvo ($< 2\text{mm}$), con una humedad menor a 10%. Se realizaron tres réplicas para cada condición de temperatura.

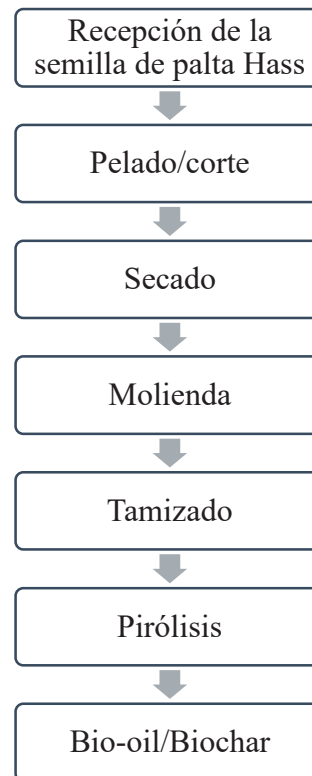


Figura 1. Flujo del proceso de pirólisis rápida.

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización del producto final

Una vez finalizado el proceso de pirólisis rápida de la semilla de palta Hass, se caracterizaron los productos sólidos y líquidos obtenidos a la mejor temperatura.

RESULTADOS

Análisis de la semilla de palta

Las semillas de palta Hass fueron analizadas en el laboratorio de energías renovables de la UNALM conforme a la norma ASTM D7582, a partir de lo cual se obtuvieron los resultados que se muestran en las Tablas 1 y 2.

En la Tabla 1, se observa que la muestra de palta Hass tiene una gran cantidad de agua con un promedio de humedad del 46.36%, una gran cantidad de materia volátil con un promedio de 45.29%, un promedio de 1.7% de ceniza y un promedio de 6.65% de carbono fijo.

En la Tabla 2, se muestran los rendimientos de la pirólisis experimental obtenidos en el laboratorio de termoquímica. Se puede observar que el mayor rendimiento promedio de obtención del bio-oil

Tabla 1. Análisis proximal de la semilla de palta en base húmeda.

Corrida	% humedad	% materia volátil	% ceniza	% carbono fijo
1	34.27	55.38	2.29	8.06
2	46.36	45.09	1.41	7.14
3	58.44	35.4	1.4	4.76
Desviación estándar	12.085	9.992	0.511	1.703
Promedio (%)	46.36	45.29	1.7	6.65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resultados de la pirólisis experimental.

Tratamiento	Factor 1 (producto)	Factor 2 (temperatura)	% rendimiento 1	% rendimiento 2	% rendimiento 3	Rendimiento promedio
1	Bio-oil	300°C	35	35	37.2	35.73
2	Bio-oil	400°C	40.8	44.4	44	43.07
3	Bio-oil	500°C	43.4	47.8	48.2	46.47
4	Biochar	300°C	44	46.2	45.8	45.33
5	Biochar	400°C	34	33.6	33.6	33.73
6	Biochar	500°C	30	30.2	28.8	29.67

Fuente: Elaboración propia.

fue del 46.47% a 500°C y el mayor rendimiento promedio de obtención de biochar fue del 45.33% a 300°C.

Caracterización de los productos obtenidos

En la Tabla 3, se muestra la caracterización de los productos que se obtuvieron de la pirólisis rápida a una temperatura de 500°C.

No se pudo determinar el poder calorífico superior del bio-oil porque tiene un gran porcentaje de agua. El poder calorífico del biochar fue de 28 282 KJ/kg.

En la Figura 2, se puede observar la relación inversa entre el rendimiento de obtención del bio-oil y del biochar; a mayor temperatura, se obtiene mayor rendimiento de bio-oil y a menor temperatura se obtiene mayor rendimiento de biochar.

Contrastación de hipótesis

Para la comprobación de las hipótesis, se utilizó un diseño factorial de 2×3×3.

Prueba de hipótesis general

H_g : El rendimiento es igual para el bio-oil y el biochar.

H_0 : El rendimiento no es igual para el bio-oil y el biochar.

Se realizó el análisis de varianza que se aprecia en la Tabla 4. Si el valor de $p > 0.05$, entonces la hipótesis nula es aceptada. Si el valor de $p < 0.05$, entonces se descarta la hipótesis nula (H_g) y se asume como verdadera la hipótesis alternativa (H_0).

A partir de los resultados, se rechaza la hipótesis H_g , con un valor de p de 0.0000007 y se acepta la H_0 , lo que demuestra que existe una variación significativa en el rendimiento entre el bio-oil y el biochar. Entonces es posible afirmar que el tipo de producto utilizado tiene un efecto significativo en el rendimiento.

El resumen del modelo se presenta en la Tabla 5.

Prueba de hipótesis específica 1

H_g : El rendimiento es igual a temperaturas de 300°C, 400°C y 500°C.

H_0 : El rendimiento no es igual a temperaturas de 300°C, 400°C y 500°C.

En la Tabla 4, se presenta el análisis de varianza realizado. Si $p > 0.05$, entonces se acepta la H_g ; si $p < 0.05$, se rechaza la H_g y se asume como correcta la H_0 .

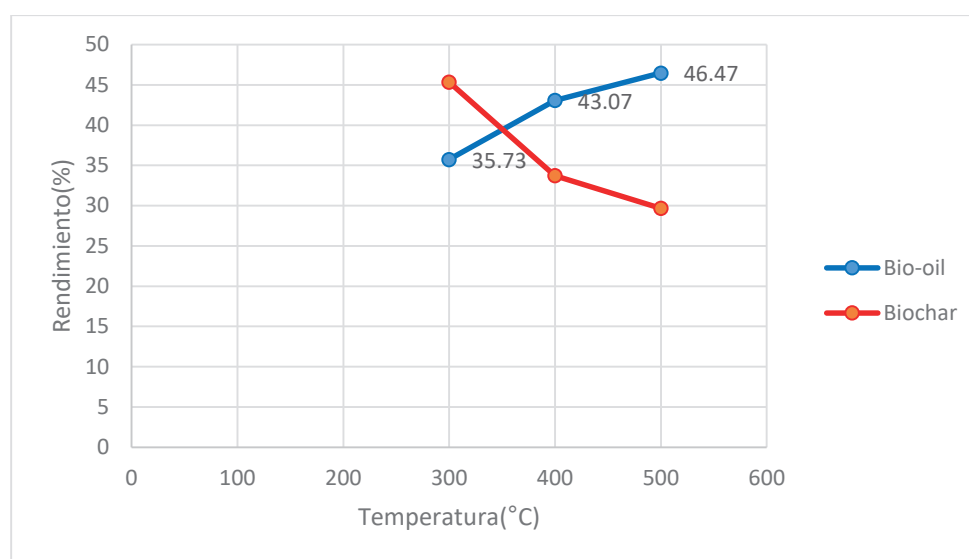
A partir de los resultados, se rechaza la hipótesis H_g , con un valor de p de 0.036525 y se acepta la H_0 , lo que demuestra que existe una diferencia

Tabla 3. Caracterización de los productos (líquido y sólido) obtenidos a la temperatura de 500°C, donde se alcanzan el máximo rendimiento de productos líquidos.

Parámetro	Método	Valor
Producto líquido		
Densidad (g/m ³)	ASTM D5002	1.0622
Poder calorífico superior	ASTM D240	ND
Producto sólido		
Poder calorífico superior (kJ/kg)	ASTM D240	28 282

ND: El producto tiene alto contenido de agua y no se enciende en la bomba calorimétrica

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Relación inversa entre rendimientos del bio-oil y del biochar.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Análisis de varianza.

Fuente	gl	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	713.76	142.752	58.67	0.000
Lineal	3	158.17	52.723	21.67	0.000
Producto	1	136.68	136.68	56.17	0.000
Temperatura	2	21.49	10.747	4.42	0.037
Interacciones de 2 términos	2	555.59	277.796	114.16	0.000
Producto*Temperatura	2	555.59	277.796	114.16	0.000
Error	12	29.20	2.433		
Total	17	742.96			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Resumen del modelo.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.55991	96.07%	94.43%	91.16%

Fuente: Elaboración propia.

significativa en el rendimiento a diferentes temperaturas. Entonces es posible afirmar que la temperatura tiene un efecto significativo en el rendimiento.

DISCUSIÓN

Esta es una investigación cuantitativa de tipo experimental. A partir de los hallazgos encontrados, se aceptó la hipótesis alternativa que establece que existe una diferencia significativa entre el rendimiento del bio-oil y del biochar.

De los resultados mostrados en la Tabla 2, se aprecia que el mayor rendimiento de bio-oil (46.47%) se obtuvo a una temperatura de 500°C y el mayor rendimiento promedio del biochar (45.33%) se obtuvo a 300°C. Ambos se trabajaron a una presión de vacío de 67.461 kPa (abs) con una velocidad de calentamiento promedio de 8.4°C/min, por un periodo de tres horas. Se observa que ambos rendimientos son inversos, es decir, a menor temperatura mayor rendimiento de biochar. En la investigación de Yarbay et al. (2020), la pirólisis fue realizada en un reactor Heinze a 500°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min y un tiempo de retención de 20 min, con lo que se obtuvo un rendimiento del 32% del producto líquido y 34% del producto sólido. Asimismo, en su estudio realizado utilizando un reactor rotativo a temperaturas que oscilaban entre 150°C y 900°C, Sánchez et al. (2016) obtuvieron el mejor rendimiento de biochar (36.7%) a 304°C y las fracciones líquidas representan el 53%-56% en peso de la biomasa original. La cantidad de carbón producido depende de la temperatura de pirólisis, las temperaturas bajas producen más carbón y las temperaturas altas producen menos (Basu, 2010).

En la Tabla 3, se presenta la caracterización de los productos del bio-oil y biochar a 500°C. Se obtuvo una densidad del bio-oil de 1.0622 g/cm³; sin embargo, no fue posible calcular su poder calorífico por el alto contenido de agua y la bomba de calorimétrica no ignita. Por el contrario, se obtuvo un poder calorífico superior de 28 282 kJ/kg para el biochar. Sánchez et al. (2016) obtuvieron por torrefacción de la semilla de palta a 500°C un poder calorífico superior de 30.2 MJ/kg para el biochar y un poder calorífico superior de 3 MJ/kg para el bio-oil.

En la Figura 1, se puede apreciar la relación inversa entre la temperatura y el rendimiento del bio-oil y biochar. Se observa una tendencia creciente del bio-oil, mientras que el rendimiento del biochar disminuye a medida que aumenta la temperatura, desde 45.33% a 300°C hasta 29.67% a 500°C. Sánchez et al. (2016) afirman que el punto

principal de la pirólisis del aguacate tiene lugar principalmente a temperaturas comprendidas entre 300°C y 500°C, lo que da lugar a la formación de una fracción líquida, de este modo, el rendimiento del bio-oil aumenta progresivamente a 500°C.

CONCLUSIONES

El proceso de pirólisis permitió darle un uso a la semilla de palta para su aprovechamiento industrial, mediante el cual se obtuvo bio-oil, biochar y gases no condensables, estos últimos no han sido investigados en este estudio.

El mayor rendimiento promedio de bio-oil obtenido fue de 46.47% pirolizado a 500°C y el mayor rendimiento promedio de biochar obtenido fue de 45.33% pirolizado a 300°C. Se recomienda hacer un estudio tecnoeconómico para el escalamiento industrial del bio-oil y el biochar, dado que tienen aplicaciones industriales como combustible, mejorador de suelos, filtración etc.

Se obtuvo biochar como subproducto con un poder calorífico superior apto para ser usado como combustible. No fue posible calcular el poder calorífico del bio-oil obtenido por su gran cantidad de agua.

Por otra parte, existe una relación inversa entre el rendimiento del bio-oil y el biochar.

REFERENCIAS

- [1] Aysu, T., y Durak, H. (2015). Assessment of avocado seeds (*Persea americana*) to produce bio-oil through supercritical liquefaction. *Biofpr*, 9(3), 231-257. <https://doi.org/10.1002/bbb.1535>
- [2] Barbosa Martín, E., Chel Guerrero, L., González Mondragón, E., y Betancur Ancona, D. (2016). Chemical and technological properties of avocado (*Persea americana* Mill.) seed fibrous residues. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 457-463. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.fbp.2016.09.006>
- [3] Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and theory*. Academic Press.
- [4] Boateng, A. A. (2020). *Pyrolysis of Biomass for fuels and chemicals*. Londres, Reino Unido: Academic Press.
- [5] Brown, R., y Wang, K. (Eds.). (2017). *Fast Pyrolysis of Biomass: Advances in Science*

- and Technology*. Washington DC, EE. UU.: The Royal Society of Chemistry.
- [6] Caldeira, C., Vlysidis, A., Fiore, G., De Laurentiis, V., Vignali, G., y Sala, S. (2020). Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresource Technology*, 312, 54. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123575>
- [7] Colombo, R., y Papetti, A. (2019, February). Avocado (*Persea americana* Mill.) by-products and their impact: from bioactive compounds to biomass energy and sorbent material for removing contaminants. A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 943-951. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14143>
- [8] Dávila, J. A., Rosenberg, M., Castro, E., y Cardona, C. A. (2017). A model biorefinery for avocado (*Persea americana* mill.) processing. *Bioresource Technology*, 243, 17-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.063>
- [9] Domínguez, M. P., Araus, K., Bonert, P., Sánchez, F., San Miguel, G., y Toledo, M. (2014). The Avocado and Its Waste: An Approach of Fuel Potential/Application. En G. Lefebvre, E. Jiménez, y B. Cabañas (Eds.), *Environment, Energy and Climate Change II* (pp. 199-223). Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/10.1007/698_2014_291
- [10] Durak, H., y Aysu, T. (2014). Effect of pyrolysis temperature and catalyst on production of bio-oil and bio-char from avocado seeds. *Research on Chemical Intermediates*, 41, 8067-8097. <https://doi.org/10.1007/s11164-014-1878-0>
- [11] Dyjakon, A., Sobol, L., Noszczyk, T., y Mitrega, J. (2022). The Impact of Torrefaction Temperature on the Physical-Chemical Properties of Residual Exotic Fruit (Avocado, Mango, Lychee) Seeds. *Energies*, 15(2), 612. <https://doi.org/10.3390/en15020612>
- [12] Fabbri, D., Li, Y., y Wang, S. (2021). Biomass Processing via Pyrolysis. En D. Ravelli, y C. Samorì (Eds), *Biomass Valorization: Sustainable Methods for the Production of Chemicals*, (pp. 149-180). <https://doi.org/10.1002/9783527825028.ch6>
- [13] Garcia Vallejo, M. C., Solarde Toro, J. C., Ortiz Sanchez, M., Chamorro Anaya, L., Chamorro Anaya, L., Peroza Piñeres, P., Pérez Cordero, A., y Cardona Alzate, C. A. (2023). Exploring the production of antioxidants and biogas from avocado (*Persea Americana* var. *Americana*) residues as an alternative for developing rural bioeconomies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101089>
- [14] Gómez García, R., Campos, D. A., Aguilar, C. N., Madureira, A. R., y Pintado, M. (2021). Valorisation of food agro-industrial by-products: From the past to the present and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113571>
- [15] Lara Flores, A. A., Araujo, R. G., Rodríguez Jasso, R. M., Aguedo, M., Aguilar, C. N., Trajano, H. L., y Ruiz, H. A. (2018). Bioeconomy and Biorefinery: Valorization of Hemicellulose from Lignocellulosic Biomass and Potential Use of Avocado Residues as a Promising Resource of Bioproducts. En R. Singhanian, R. Agarwal, R. Kumar, y R. Sukumaran, (Eds.), *Waste to Wealth* (pp.141-170). https://doi.org/10.1007/978-981-10-7431-8_8
- [16] Mantilla, S., Manrique, A., y Gauthier-Maradei, P. (2015). Methodology for extraction of phenolic compounds of bio-oil from agricultural biomass wastes. *Waste Biomass Valor*, 6, 371-383. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9361-8>
- [17] Martín Lara, M.A., y Calero de Hoces, M. (2020). *Energía de la biomasa y biocombustibles*. Granada, España: Universidad de Granada.
- [18] Martinez-Burgos, W. J., Bittencourt Sydney, E., Pedroni Medeiros, A. B., Magalhaes, A. I., Carvalho, J. C., Karp, S. G., Vandenberghe, L., Letti, L. A. J., Soccol, V. T., Pereira, G. V., Rodrigues, C., Woiciechowski, A. L., y Soccol, C. R. (2021). Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals. *Bioresource technology*, 341, 11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125795>
- [19] Nizami, A. S., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M. Z., Syamsiro, M., Ismail, I. M. I., y Pant, D. (2017). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology*, 241, 1101-1117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>
- [20] Perea Moreno, A. J., Aguilera Ureña, M. J., y Manzano Agugliaro, F. (2016). Fuel Properties of avocado stone. *Fuel*, 186, 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.101>

- [21] Prasad, S., Singh, A., Korres, N., Rathore, D., Sevda, S., y Pant, D. (2020). Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective. *Bioresource Technology*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122964>
- [22] Safarin, S. (2023). Performance analysis of sustainable technologies for biochar production: A comprehensive review. *Energy Reports*, 9, 4574-4593. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.111>
- [23] Sánchez, F., Araus, K., Domínguez, P., y San Miguel, G. (2016). Thermochemical Transformation of Residual Avocado Seeds: Torrefaction and Carbonization. *Waste Biomass Valorization*, 8, 2495-2510. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9699-6>
- [24] Velásquez Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Valencia, España: Reverté.
- [25] Yarbay, R., Örenay, O., Dolas, Y., Seyda, A., y Ozbay N. (2020). Experimental Study of Thermal Pyrolysis of Avocado Seed for Liquid Fuel Production. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, 4(4), 447-452. <https://doi.org/10.29329/ijjaar.2020.320.6>
- [26] Zhang, Y., Liang, Y., Li, S., Yuan, Zhang, D., Wu, Y., W., Xie, H., Brindhadevi, K., Pugazhendhi, y A. Xia, C. (2023). A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades. *Fuel*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128461>