

Estudio experimental de la revalorización de la semilla de aguacate mediante pirólisis

Experimental study on the valorization of avocado seed through pyrolysis

María de los Ángeles González Morales, Alexia Sabine Smith Ortega, Kevinn Noé Vázquez Flores, José Manuel Riesco Ávila.

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca.
Carretera Salamanca - Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, C.P. 36787, México.

mdla.gonzalezmorales@ugto.mx, as.smithortega@ugto.mx, kn.vazquezflores@ugto.mx, riesco@ugto.mx.

Resumen

La pirólisis de biomasa lignocelulósica se presenta como una alternativa viable para la producción de bioaceites con potencial uso como biocombustible. En este estudio, se evaluó la pirólisis de semilla de aguacate (*Persea americana*) a temperaturas de 300, 400, 500 y 600 °C, así como una prueba de copirólisis con poliestireno (60-40 en masa) a 500 °C, utilizando un reactor semi-batch. Los resultados mostraron que la mayor producción de líquido pirolítico se alcanzó a 500 °C, con un rendimiento de 49.55 %, mientras que la copirólisis incrementó este rendimiento a 51.15 %. El bioaceite obtenido a 500 °C presentó el mayor poder calorífico (40 722 kJ/kg), superando al aceite extraído por Soxhlet (38 400 kJ/kg), mientras que a 600 °C se registró una reducción significativa en el contenido energético (33 848 kJ/kg). El análisis fisicoquímico reveló densidades cercanas a la del agua y viscosidades superiores a ésta, confirmando la compleja composición del bioaceite. La separación de fases evidenció que temperaturas elevadas favorecen la formación de emulsiones estables y compuestos resinosos que dificultan la recuperación de la fase oleosa. Finalmente, el bajo contenido de lípidos (0.6667 %) y el contenido de humedad moderado (11.178 %) de la semilla de aguacate demostraron que la generación de bioaceite depende mayormente de la descomposición de otros componentes lignocelulósicos. Estos resultados sugieren que la pirólisis a 500 °C representa una temperatura óptima para maximizar el rendimiento y calidad energética del bioaceite obtenido.

Palabras clave: Pirólisis, Bioaceite, Semilla de Aguacate, Copirólisis.

Introducción

La pirólisis es una técnica de conversión termoquímica ampliamente utilizada para la valorización energética de biomasa lignocelulósica, en la que la descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno produce tres fracciones principales: biocarbón, bioaceite y biogás [1]. Este proceso ha recibido creciente atención por su potencial para transformar residuos agrícolas en productos con aplicaciones energéticas, ambientales y agronómicas. Entre las diversas fuentes de biomasa, la semilla de aguacate (*Persea americana*) ha despertado interés como materia prima prometedora debido a su abundante disponibilidad como subproducto agroindustrial, su bajo costo y su composición rica en componentes lignocelulósicos [2].

Según estudios como el de Alipour *et al.* [3], la pirólisis de semilla de aguacate permite obtener biocarbón y bioaceite con rendimientos competitivos, mientras que análisis como los de Vargas *et al.* [4] han reportado un contenido de carbono de 42% y humedad cercana al 7%, características que la convierten en una excelente candidata como biomasa. Además, investigaciones de Ledezma-Espinoza *et al.* [5] señalan que la semilla de aguacate posee una proporción significativa de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que la hace adecuada para procesos termoquímicos. Estos hallazgos coinciden con los resultados de Kumar *et al.* [6], quienes documentan el potencial energético de diversas biomásas lignocelulósicas cuando se utilizan temperaturas de pirólisis entre 400–600 °C.

La gestión de residuos plásticos y agroindustriales representa un desafío ambiental relevante, pues los primeros son altamente persistentes y los segundos, aunque biodegradables, suelen ser subutilizados. En este sentido, la co-pirólisis de biomasa y plásticos emerge como una estrategia prometedora para producir

combustibles líquidos y sólidos con alto poder calorífico, reduciendo simultáneamente el impacto ambiental de ambos residuos [7,8].

Por otro lado, técnicas como el análisis termogravimétrico (TGA), el análisis elemental (CHNS), el análisis proximal (ASTM D3173-D3175) y la espectroscopía FTIR permiten caracterizar de forma precisa la biomasa, determinando parámetros como contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y grupos funcionales presentes [9,10]. Estas herramientas son fundamentales para evaluar la idoneidad de la materia prima en procesos de pirólisis y co-pirólisis.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en la valorización de semillas de aguacate mediante pirólisis y co-pirólisis con poliestireno, así como en la caracterización fisicoquímica del líquido pirolítico obtenido, evaluando parámetros como densidad y viscosidad para determinar su potencial como biocombustible.

Pirólisis de biomasa y valorización de la semilla de aguacate

La pirólisis de biomasa lignocelulósica constituye una tecnología clave para la valorización de residuos agroindustriales, al permitir su conversión en productos como bioaceite, biogás y biocarbón con aplicaciones energéticas y ambientales. Jiménez-Quero *et al.* [11] evaluaron la pirólisis de semillas de aguacate como alternativa de valorización, demostrando que la temperatura y la tasa de calentamiento influyen significativamente en el rendimiento y en la calidad del bioaceite y del biocarbón obtenidos. Este estudio confirmó que la semilla de aguacate, por su alto contenido de compuestos lignocelulósicos, puede aprovecharse para generar productos con aplicaciones como combustibles líquidos y materiales adsorbentes, fortaleciendo el potencial de esta biomasa como recurso renovable.

De manera más específica, Njoku *et al.* [12] estudiaron la pirólisis de semillas de aguacate y reportaron que a temperaturas de 400–600 °C se obtienen bioaceites con fracciones de hidrocarburos y ácidos grasos, así como biocarbón con propiedades adecuadas para su uso como adsorbente de contaminantes en aguas residuales. Este trabajo destaca la versatilidad de la semilla de aguacate como materia prima para la generación de productos de alto valor agregado, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles para el manejo de residuos agroindustriales.

Semilla de Aguacate (*Persea americana*)

La semilla de aguacate, también llamada hueso, es la parte interna del fruto usualmente considerada desecho (Figura 1), representando entre el 13 y 17 % de su peso. Es rica en proteínas, almidón, lípidos, fibra, vitaminas, minerales y fitoquímicos [13]. Contiene el 63 % de los compuestos fenólicos y el 57 % de la capacidad antioxidante total del fruto [14]. Está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, característicos de materiales lignocelulósicos [15]. Sus minerales principales incluyen calcio, zinc, potasio, sodio, fósforo, hierro, cobre, plomo y cobalto, además de fitoquímicos como flavonoides, taninos y alcaloides [16].

Esta composición química influye no solo en su potencial energético, sino también en su comportamiento durante procesos termoquímicos como la pirólisis. Los compuestos fenólicos y antioxidantes afectan la estabilidad térmica y la formación de productos secundarios, mientras que los minerales pueden influir en las propiedades catalíticas durante la descomposición [17]. Estudios recientes muestran que tras la pirólisis, la semilla desarrolla una estructura microporosa, lo que la hace prometedora para aplicaciones en adsorción ambiental y almacenamiento de energía [18]. Esta dualidad entre su composición bioquímica y estructura física resalta la importancia de caracterizar detalladamente la semilla para optimizar su valorización en procesos industriales y ambientales.



Figura 1. Semilla de aguacate (*Persea americana*).

Pirólisis

La pirólisis es un proceso de degradación térmica en el que materiales de alto peso molecular se descomponen para generar compuestos volátiles primarios. Este proceso incluye reacciones principales de degradación y deshidrogenación, junto con reacciones secundarias como polimerización e isomerización de los productos volátiles [19]. La velocidad de reacción depende fuertemente de la temperatura, incrementándose a medida que ésta aumenta. En términos generales, la pirólisis es una técnica termoquímica que somete sólidos o líquidos a altas temperaturas en un ambiente inerte, idealmente sin oxígeno. Sin embargo, en la práctica, es difícil eliminar completamente el oxígeno, lo que puede causar pequeñas reacciones de oxidación durante el proceso [20]. Los productos resultantes incluyen cenizas y sólidos, gases no condensables, y líquidos condensables o bioaceites. La cantidad y composición de estos productos dependen principalmente del tipo de materia prima, aunque también influyen factores como temperatura, tasa de calentamiento, tiempo de residencia, presión, tamaño de partícula y diseño del reactor [21]. En este estudio, se empleó un reactor semi-batch (Figura 2).

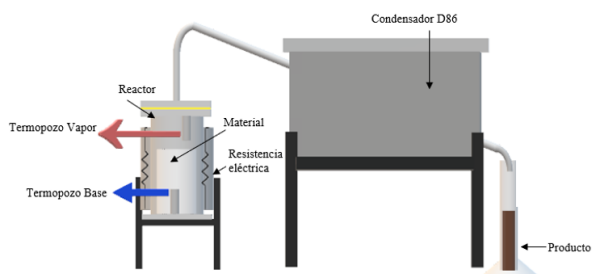


Figura 2. Configuración del reactor semi-batch.

Biocarbón

El biocarbón es el producto sólido de la pirólisis de la biomasa lignocelulósica compuesto principalmente de carbono (85 % aprox.), aunque también puede contener hidrógeno y oxígeno. Es un producto valioso que es un biocombustible del tipo sólido, el cual también puede ser usado como un mejorador del suelo, para la reducción de la contaminación del suelo, y producción de carbón activado [22, 23].

Bioaceite

El bioaceite es el líquido condensado obtenido de la pirólisis de biomasa lignocelulósica, generalmente de color marrón y con viscosidad variable. Está compuesto por agua y diversos compuestos orgánicos derivados de la desvolatilización de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como de procesos de polimerización y fragmentación [24,25]. Su composición incluye una amplia variedad de grupos funcionales, destacándose agua (10-30 %), azúcares, hidroxiacetaldehído, ácido acético y compuestos aromáticos como fenoles [26]. También puede contener pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno [27].

Metodología

La materia prima utilizada en las pruebas de pirólisis fue semillas de aguacate (*Persea americana*) recolectadas como residuo orgánico de una cadena de restaurantes en Salamanca, Guanajuato, México. Tras su recolección, las semillas se secaron de forma natural a temperatura ambiente (22–26 °C) durante 12 meses, reduciendo su contenido de humedad y permitiendo un almacenamiento prolongado. Estas semillas secas fueron empleadas en los experimentos.

Antes de las pruebas experimentales, las semillas de aguacate secas se cortaron manualmente en mitades, obteniendo un tamaño promedio de 27.5 mm de largo, 25.6 mm de ancho y 13.3 mm de espesor. Este tamaño

fue influenciado por la degradación de celulosa y hemicelulosa debido a la proliferación de microorganismos (principalmente hongos) durante el almacenamiento prolongado (Figura 3), lo que provocó un aumento relativo en el contenido de lignina, compuesto responsable de la rigidez estructural de la biomasa lignocelulósica [28,29].



Figura 3. Semilla de aguacate (*Persea americana*) con hongos.

Se realizaron cinco pruebas experimentales: cuatro de pirólisis a 300, 400, 500 y 600 °C, cada una con 3 horas de residencia, y una de copirólisis a 500 °C con 600 g de semillas de aguacate y 400 g de poliestireno comprimido. En todos los casos se usó 1 kg de semilla de aguacate seca (Figura 4), bajo las mismas condiciones en un reactor semi-batch. Las temperaturas seleccionadas cubrieron el rango óptimo reportado para la pirólisis de biomasa lignocelulósica, desde 300 °C (pirólisis lenta) hasta 600 °C (mayor descomposición térmica).



Figura 4. Pesaje de las semillas de aguacate.

Durante las pruebas se recolectaron y cuantificaron las fracciones sólidas (biocarbón) y líquidas (líquido pirolítico). El biocarbón se pesó y almacenó para su caracterización morfológica, con el propósito de analizar su estructura superficial y evaluar su potencial como adsorbente o combustible sólido (Figura 5). Además, se tomaron fotografías microscópicas para comparar la coloración y textura de las muestras obtenidas a diferentes temperaturas y en la copirólisis. Aunque los gases no condensables no fueron recolectados ni analizados, se considera su generación inherente al proceso de pirólisis.



Figura 5. Muestras de biocarbón almacenadas y seleccionadas: a) biocarbón a 300 °C; b) biocarbón a 400 °C; c) biocarbón a 600 °C.

En las pruebas de pirólisis y copirólisis a 500 °C, el líquido pirolítico mostró una separación visible en dos fases, acuosa y oleosa, las cuales fueron separadas utilizando un embudo de decantación para su análisis individual (Figura 6). En la prueba a 600 °C se intentó realizar el mismo procedimiento; sin embargo, la fracción oleosa no se separó claramente y permaneció adherida a las paredes del embudo, lo que requirió un tratamiento adicional con disolventes.

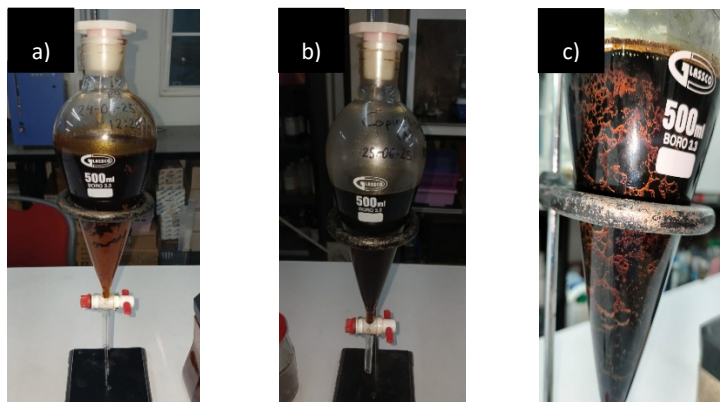


Figura 6. Separación del líquido pirolítico mediante embudo de separación: a) prueba de pirólisis a 500 °C; b) prueba de copirólisis a 500°C (60-40); c) prueba de pirólisis a 600°C.

La prueba de copirólisis, con 600 g de semilla de aguacate y 400 g de poliestireno comprimido (proporción 60-40 en masa), se llevó a cabo durante 3 horas bajo las mismas condiciones operativas del reactor. El líquido pirolítico obtenido se separó parcialmente en fases acuosa y oleosa, mientras que otra parte se conservó como mezcla completa para comparar sus propiedades.

Caracterización fisicoquímica

Para evaluar las propiedades y el potencial del líquido pirolítico, así como caracterizar la materia prima, se realizaron análisis fisicoquímicos de densidad, viscosidad, contenido de lípidos y humedad. Estos parámetros permiten comprender la composición y el comportamiento del bioaceite, además de evaluar la calidad de la biomasa y su idoneidad para el proceso termoquímico. A continuación, se describen los métodos empleados para cada determinación.

Densidad por picnómetro

Para caracterizar las propiedades fisicoquímicas del líquido pirolítico, se determinó su densidad como parámetro clave para estimar su composición y posibles aplicaciones. La medición se realizó con un picnómetro Jaulmes de 50 mL calibrado a 20 °C, siguiendo la norma ISO 6883, que establece el procedimiento para obtener la masa de un volumen exacto de líquido (Figura 7).

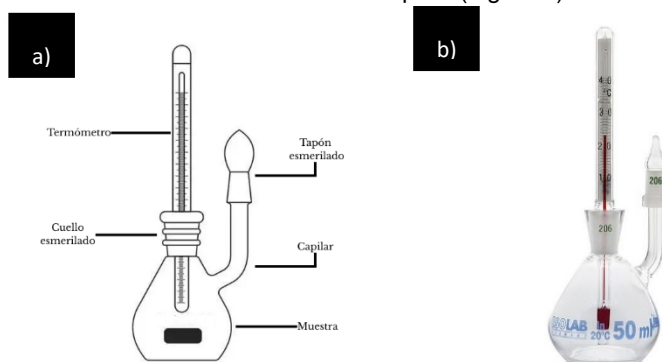


Figura 7. a) Esquema del picnómetro Jaulmes; b) Picnómetro Jaulmes.

Viscosidad cinemática

La viscosidad del líquido pirolítico se determinó conforme a la norma ASTM D445, empleando un viscosímetro tipo Cannon-Fenske para líquidos pesados, calibrado a 40 °C y apto para un rango de 20 a 2000 mm²/s. Para asegurar la temperatura constante durante el análisis, el viscosímetro se colocó en un baño termostático con control digital, garantizando la estabilidad térmica exigida por el método (Figura 8).

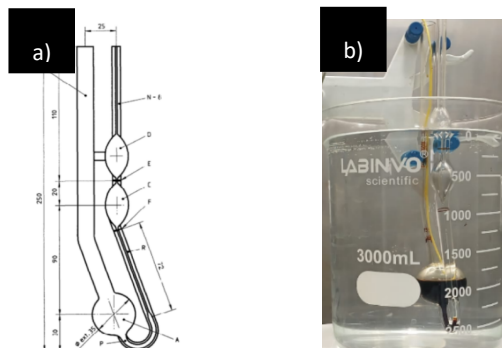


Figura 8. a) Esquema del viscosímetro Cannon-Fenske; b) Viscosímetro Cannon-Fenske.

Determinación del poder calorífico del bioaceite y extracto lipídico

El poder calorífico superior (PCS) de las fracciones líquidas se determinó mediante un calorímetro tipo bomba adiabática IKA C 6000 isoperibol package 1/10 [30], siguiendo la norma ASTM D4809. Las muestras analizadas correspondieron al aceite extraído por Soxhlet, al aceite separado del líquido pirolítico de la prueba a 500 °C y al aceite recuperado del líquido pirolítico de la prueba a 600 °C. Para cada medición, se pesaron 0.47 g del aceite de Soxhlet, 0.45 g del aceite de 500 °C y 0.44 g del aceite de 600 °C, los cuales se colocaron en cápsulas de muestra dentro de la bomba calorimétrica. Posteriormente, la bomba se presurizó con oxígeno según las especificaciones de la norma, se selló y se sumergió en el vaso calorimétrico con un volumen de agua conocido. La combustión se inició por ignición eléctrica, registrándose el aumento de temperatura del sistema, a partir del cual el equipo calculó automáticamente el PCS de cada muestra, aplicando las correcciones estipuladas en ASTM D4809 (Figura 9).

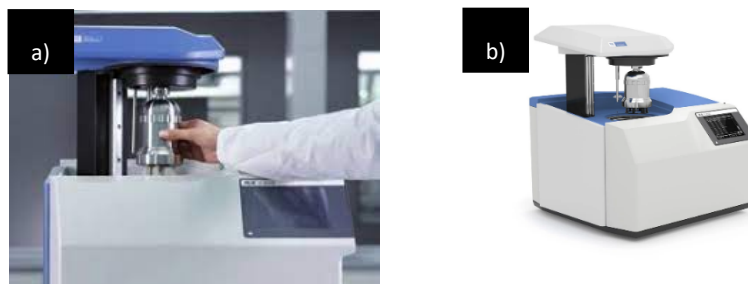


Figura 9. a) Colocación del recipiente de disgregación; b) Bomba calorimétrica.

Determinación del contenido de lípidos (extracción Soxhlet)

Se determinó el contenido de lípidos en la semilla de aguacate mediante extracción Soxhlet (Figura 10), utilizando hexano como disolvente. La extracción se realizó durante 20 horas continuas, con recambios de muestra cada 90 minutos. En cada ciclo, se colocó una porción de 25 g de semilla previamente seca y triturada

en papel filtro dentro del equipo Soxhlet, permitiendo la recuperación eficiente de los lípidos presentes en la biomasa.

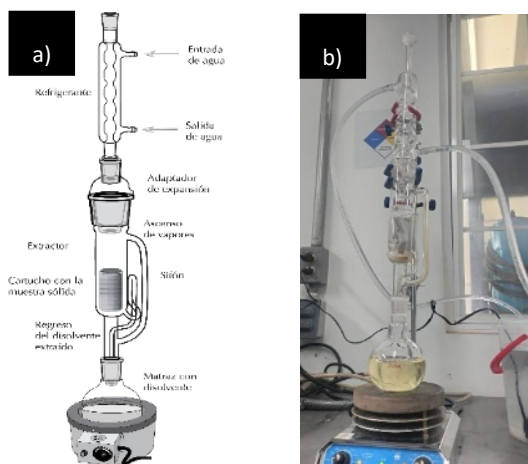


Figura 10. a) Esquema del Soxhlet; b) Equipo Soxhlet.

Al finalizar el proceso, el disolvente fue evaporado y el residuo lipídico recuperado fue pesado para calcular el rendimiento de extracción de lípidos, expresado como el porcentaje de lípidos respecto al peso seco inicial de la muestra, utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{lípidos} = \frac{m_{\text{aceite}}}{m_{\text{muestra}}} \times 100 \quad (1)$$

donde:

%lípidos representa el porcentaje de lípidos extraídos respecto al peso seco de la muestra.

m_{aceite} representa la masa de aceite recuperado.

m_{muestra} indica la masa de la muestra inicial.

Determinación del contenido de humedad

Para determinar el porcentaje de agua presente en la biomasa antes del proceso de pirólisis, se realizó un análisis gravimétrico del contenido de humedad. Este procedimiento consistió en pesar inicialmente 5 g de semilla seca, los cuales fueron colocados en un horno a 105 °C durante 20 horas. Posteriormente, se registró el peso final de la muestra, calculando el contenido de humedad como el porcentaje de la pérdida de masa respecto al peso inicial, siguiendo la fórmula correspondiente.

$$\%H = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (2)$$

donde:

%H es el porcentaje de humedad.

m_{inicial} corresponde a la masa con humedad.

m_{seco} es la masa obtenida después del secado.

Resultados

Rendimientos de líquidos obtenidos en las pruebas de pirólisis y copirólisis

Los resultados de las pruebas de pirólisis evidencian claramente el impacto de la temperatura en la distribución y el rendimiento de los productos generados. A continuación, se detallan los rendimientos obtenidos en las pruebas individuales a 300, 400, 500 y 600 °C, así como en la prueba de copirólisis con mezcla 60-40 (semilla de aguacate-poliestireno) a 500 °C, con el objetivo de comparar la influencia de estos parámetros en la conversión termoquímica.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del rendimiento de líquido pirolítico obtenido en las pruebas de pirólisis y copirólisis realizadas a diferentes temperaturas. Se observa que, durante la pirólisis, el rendimiento del líquido aumenta progresivamente con la temperatura, alcanzando un valor máximo de 49.55 % a 500 °C. Sin embargo, al incrementar la temperatura a 600 °C, el rendimiento disminuye a 39.64 %, lo que podría atribuirse a una mayor degradación térmica de la biomasa que favorece la formación de gases no condensables en detrimento de los productos líquidos.

Tabla 1. Rendimiento de líquidos obtenidos por pirólisis y copirólisis a distintas temperaturas.

Proceso	Temperatura [°C]	Masa inicial [g]	Volumen final [mL]	Masa líquida [g]	Rendimiento [%]
Pirólisis	300	1000	200	198.2	19.82
Pirólisis	400	1000	460	455.9	45.59
Pirólisis	500	1000	500	495.5	49.55
Pirólisis	600	1000	400	396.4	39.64
Copirólisis	500	1000	550	511.5	51.15

Por otro lado, la copirólisis realizada a 500 °C mostró un rendimiento de líquido ligeramente superior (51.15 %) en comparación con la pirólisis convencional a la misma temperatura, lo que sugiere un posible efecto sinérgico entre la biomasa y el poliestireno que favorece la formación de productos líquidos.

La Figura 11 ilustra esta tendencia, destacando visualmente que existe un rango de temperatura favorable para maximizar el rendimiento. La curva correspondiente a la pirólisis muestra un aumento hasta 500 °C, seguido de una caída, lo que indica que esa temperatura representa el punto más eficiente dentro de los ensayos realizados. La copirólisis, representada como un único punto de comparación, resalta su potencial como alternativa para mejorar el rendimiento sin necesidad de aumentar la temperatura.

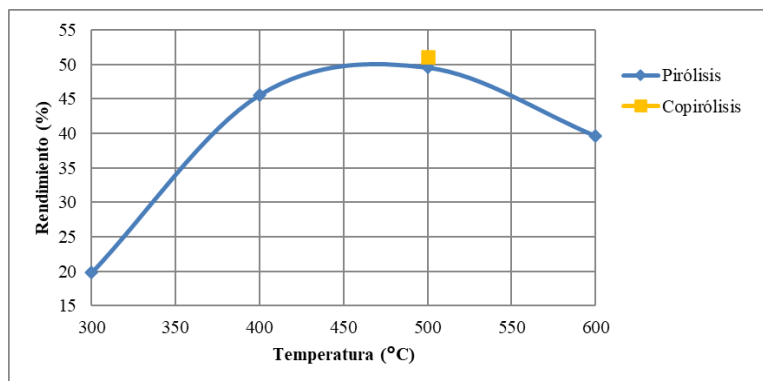


Figura 11. Gráfica temperatura VS rendimiento.

Caracterización de propiedades fisicoquímica del bioaceite

La Tabla 2 presenta la densidad promedio del líquido pirolítico obtenido a diferentes temperaturas de pirólisis de la semilla de aguacate. Los líquidos generados a 300, 400, 500 °C (fase acuosa) y 600 °C mostraron una densidad promedio de 990.75 kg/m³, cercana a la del agua a 20 °C (998 kg/m³), lo que refleja la alta proporción de fase acuosa en estas muestras. La fracción oleosa a 500 °C presentó una densidad mayor (1006 kg/m³). En la copirólisis a 500 °C con semilla de aguacate y poliestireno, la densidad promedio fue menor (930 kg/m³). Al separar sus fases, la acuosa fue 989.6 kg/m³ y la oleosa 918.6 kg/m³, indicando una reducción en compuestos polares y un aumento de hidrocarburos volátiles derivados del poliestireno.

Tabla 2. Densidades del líquido pirolítico de la semilla de aguacate.

Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]
300	995
400	993.8
500 (oleosa)	1006
500(acuosa)	984.4
600	989.8
500-Copirólisis (mezcla)	930
500-Copirólisis (oleosa)	918.6
500-Copirólisis (acuosa)	989.6

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio de viscosidad del líquido pirolítico obtenido a diferentes temperaturas durante la pirólisis de la semilla de aguacate. La viscosidad promedio de las muestras a 300, 400, 500 °C (fracción acuosa) y 600 °C fue de 1.1737 mm²/s, superando significativamente la viscosidad del agua a 40 °C (0.6582 mm²/s), lo que refleja la compleja mezcla de compuestos orgánicos y agua comúnmente presente en bioaceites derivados de biomasa lignocelulósica [31]. La fracción oleosa obtenida a 500 °C mostró una viscosidad considerablemente mayor (5.5912 mm²/s), evidenciando una mayor concentración de compuestos pesados y polares, tales como fenoles, ácidos orgánicos y compuestos aromáticos, los cuales incrementan la resistencia al flujo [32]. Este comportamiento coincide con investigaciones previas que indican que temperaturas más elevadas durante la pirólisis favorecen la fragmentación térmica de la biomasa y la formación de moléculas de mayor peso en la fase oleosa [33].

En la prueba de copirólisis a 500 °C, donde se utilizó una mezcla de semilla de aguacate y poliestireno, la viscosidad promedio del líquido pirolítico fue de 1.6922 mm²/s. Al separar las fases, la fracción acuosa mostró una viscosidad ligeramente menor (1.0527 mm²/s) respecto a la fase acuosa de la pirólisis convencional, mientras que la fracción oleosa presentó una reducción significativa en viscosidad (1.3334 mm²/s). Este fenómeno puede atribuirse a la degradación térmica del poliestireno, que genera hidrocarburos más ligeros y de menor peso molecular, diluyendo la fracción oleosa y disminuyendo su viscosidad [34]. Estos resultados son consistentes con reportes que destacan cómo la co-pirólisis de biomasa con plásticos puede mejorar las propiedades fisicoquímicas del bioaceite, aumentando su fluidez y su potencial uso como biocombustible [35].

Tabla 3. Viscosidades del líquido pirolítico de la semilla de aguacate.

Temperatura [°C]	Viscosidad [mm ² /s]
300	0.8889
400	1.0371
500 (oleosa)	5.5912
500(acuosa)	1.6298
600	1.1385
500-Copirólisis (mezcla)	1.6922
500-Copirólisis (oleosa)	1.3334
500-Copirólisis (acuosa)	1.0527

Tras el análisis de densidad y viscosidad, se observaron diferencias significativas en el comportamiento de separación de fases del líquido pirolítico, especialmente en la prueba a 600 °C. A continuación, se presenta una descripción detallada de este fenómeno, sus posibles causas y su implicación en la calidad del bioaceite obtenido.

Comportamiento de separación de fases en líquidos pirolíticos

En las pruebas de pirólisis y copirólisis realizadas a 500 °C, el líquido pirolítico mostró una separación clara en dos fases (acuosa y oleosa), lo que permitió su caracterización individual mediante un embudo de decantación (Figura 6). Sin embargo, en la prueba de pirólisis a 600 °C, la fracción oleosa no se separó y permaneció adherida a las paredes del embudo, dificultando su recuperación.

Este fenómeno puede explicarse por varias razones relacionadas con la química de los productos de pirólisis a temperaturas elevadas. A 600 °C, la biomasa genera una mayor cantidad de compuestos oxigenados, como ácidos orgánicos, aldehídos y cetonas, que actúan como emulsificantes naturales y estabilizan mezclas tipo emulsión, dificultando la separación nítida entre las fases acuosa y oleosa [36,37]. Además, la formación de vapores pesados y compuestos termoestables, como fenoles y alquitranes, puede aumentar significativamente la viscosidad y adhesividad del bioaceite, provocando su adherencia a las superficies del embudo y dificultando su manejo [38,39].

Asimismo, a temperaturas elevadas se favorecen reacciones de polimerización y formación de compuestos resinosos o alquitranosos, especialmente si el tiempo de residencia o el enfriamiento no están controlados con precisión. Estos compuestos tienden a formar mezclas pegajosas y poco miscibles con el agua, complicando la separación por decantación [40].

Para superar esta dificultad, se aplicó un lavado con hexano, un disolvente apolar recomendado para recuperar fases oleosas en bioaceites, lo que permitió solubilizar la fracción grasa adherida y confirmar que la sustancia presente correspondía a un bioaceite con componentes lipídicos, y no a compuestos hidrosolubles [41]. La literatura científica respalda esta explicación, destacando que el perfil químico del bioaceite cambia significativamente con la temperatura de pirólisis, afectando directamente su composición, viscosidad, comportamiento de separación y potencial como biocombustible [42,43].

Caracterización energética del bioaceite

En la Tabla 4 se presentan los valores de poder calorífico superior de los líquidos obtenidos mediante extracción Soxhlet y pirólisis a diferentes temperaturas. Los resultados muestran que la pirólisis a 500 °C genera un bioaceite con mayor contenido energético en comparación con el aceite obtenido por extracción con solvente. Sin embargo, al incrementar la temperatura a 600 °C, se observa una disminución significativa en el poder calorífico, lo que podría atribuirse a una mayor descomposición de compuestos energéticos y a la formación de gases ligeros y compuestos con menor densidad energética. Estos hallazgos sugieren la existencia de un rango de temperatura óptimo, alrededor de 500 °C, para maximizar la calidad energética del líquido pirolítico obtenido.

Tabla 4. Poderes caloríficos del aceite de aguacate.

Tipo de aceite	Poder calorífico [kJ/kg]
Extraído por soxhlet	38 400
Líquido pirolítico a 500°C	40 722
Líquido pirolítico a 600°C	33 848

Determinación del contenido lipídico de la semilla de aguacate mediante extracción Soxhlet

La determinación del contenido de lípidos en la semilla de aguacate se realizó mediante el método de extracción Soxhlet, utilizando hexano como disolvente. A partir de una masa total de 300 gramos de semilla molida y seca, se obtuvieron 2 gramos de extracto lipídico (Figura 12), lo que corresponde a un rendimiento del 0.6667% respecto al peso inicial. Este bajo porcentaje indica una limitada presencia de compuestos grasos en la biomasa, lo cual sugiere que la contribución directa de los lípidos a la formación de productos líquidos durante el proceso de pirólisis es relativamente reducida.



Figura 12. Aceite de semilla de aguacate.

Determinación del contenido de humedad en la semilla de aguacate mediante método gravimétrico

El contenido de humedad de la semilla de aguacate se determinó mediante el método gravimétrico, obteniéndose un valor promedio de 11.178% (Tabla 5) en base al peso húmedo de la muestra de 5 gramos y un promedio del peso de la muestra seca 4.4411 gramos. Este resultado refleja la cantidad de agua retenida en la biomasa al momento del análisis y es un parámetro relevante, ya que influye directamente en el rendimiento del líquido pirolítico y en la eficiencia del proceso térmico. El contenido de humedad observado fue coherente con el tiempo de almacenamiento prolongado al que fue sometida la semilla (12 meses a temperatura ambiente), lo que favoreció su secado natural previo al tratamiento.

Tabla 5. Porcentaje de humedad en 3 distintas muestras de semilla de aguacate.

# capacillo	Masa inicial [g]	Masa final [g]	% de humedad
1	5	4.4425	11.150
2	5	4.4436	11.128
3	5	4.4372	11.256

Conclusiones

Se identificó que la pirólisis a 500 °C proporciona el mayor rendimiento de líquido pirolítico (49.55 %), mientras que temperaturas superiores (600 °C) reducen significativamente el rendimiento debido a una mayor generación de gases no condensables. La copirólisis a 500 °C permitió incrementar el rendimiento hasta un 51.15 %, lo que demuestra un efecto sinérgico favorable al combinar biomasa con poliestireno.

La densidad y viscosidad del bioaceite obtenido en la copirólisis fueron menores que las del bioaceite de pirólisis convencional, lo que indica una mayor proporción de hidrocarburos ligeros y menos compuestos polares. Esto sugiere que la copirólisis puede mejorar la fluidez del bioaceite y facilitar su manejo y procesamiento como biocombustible.

La separación clara en fases acuosa y oleosa a 500 °C contrasta con el fenómeno observado a 600 °C, donde la fracción oleosa quedó adherida al embudo de separación. Este comportamiento anómalo se atribuye a la formación de emulsiones estables y compuestos resinosos a temperaturas elevadas, dificultando la separación y recuperación de la fase oleosa.

El análisis del poder calorífico mostró que el bioaceite generado a 500 °C tiene un mayor contenido energético (40 722 kJ/kg) que el aceite obtenido por extracción Soxhlet (38 400 kJ/kg). Sin embargo, el poder calorífico disminuyó a 33 848 kJ/kg a 600 °C, reafirmando que temperaturas excesivamente altas degradan los compuestos energéticos clave.

La extracción Soxhlet reveló un contenido lipídico de solo 0.6667%, evidenciando que la semilla de aguacate posee una limitada cantidad de grasas, lo que indica que la generación de bioaceite en la pirólisis no depende exclusivamente de lípidos, sino también de otros componentes como la celulosa, hemicelulosa y lignina.

El contenido de humedad promedio del 11.178% en la semilla de aguacate fue consistente con el secado natural prolongado previo a las pruebas, demostrando que un bajo contenido de agua es esencial para optimizar el rendimiento del líquido pirolítico y mejorar la eficiencia del proceso termoquímico.

Referencias

- [1]. C. R. Venderbosch y W. Prins, "Fast pyrolysis technology development," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 4, no. 2, pp. 178–208, 2010, doi: 10.1002/bbb.205.
- [2]. A. K. Bhaskar, A. Uddin, and M. Muto, "Production of bio-oil from biomass and waste plastics by thermochemical liquefaction," *Energy*, vol. 29, no. 9–10, pp. 1409–1415, 2004, doi: 10.1016/j.energy.2004.03.043.
- [3]. M. Alipour, A. Tavasoli, and A. Rahmati, "Production of bio-oil from avocado seed via pyrolysis: Optimization and characterization," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 1273–1283, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.064.
- [4]. J. Vargas-Correa, P. Hernández, and A. Medina, "Characterization of biochar produced from avocado seeds: Elemental composition and surface properties," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 146, art. 104764, 2020, doi: 10.1016/j.jaap.2020.104764.
- [5]. K. Ledezma-Espinoza, M. García-Sandoval, and R. López, "Thermochemical behavior of avocado seed biomass: Proximate and ultimate analysis," *Industrial Crops and Products*, vol. 134, pp. 136–144, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.03.065.
- [6]. A. Kumar, S. K. Upadhyay, and P. Sharma, "Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar derived from agro-residues," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 12, pp. 1173–1184, 2022, doi: 10.1007/s13399-021-01570-7.
- [7]. S. Kumagai and K. Kojima, "Co-pyrolysis of biomass and plastic wastes: A review of synergy effects and kinetic models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, art. 110606, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110606.
- [8]. Y. Luo, Y. Li, and M. Wu, "Upgrading of pyrolysis oils from co-pyrolysis of biomass and plastics: Properties and applications," *Fuel Processing Technology*, vol. 199, art. 106257, 2020, doi: 10.1016/j.fuproc.2019.106257.
- [9]. ASTM International, "ASTM D3173–11: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke," West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [10]. M. K. Lam et al., "Characterization of bio-oil from palm biomass pyrolysis by FTIR and CHNS analysis," *Bioresource Technology*, vol. 204, pp. 259–266, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.037.
- [11]. J. Jiménez-Quero, A. Arauzo, J. Gonzalo, and A. Sánchez, "Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from avocado seed biomass," *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 935–944, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.118.
- [12]. C. Njoku, A. K. Uba, P. C. Nwifo, and E. N. Ogbuagu, "Characterization and adsorption potential of avocado seed biochar for removal of heavy metals from wastewater," *Bioresource Technology Reports*, vol. 14, art. 100652, 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100652.
- [13]. R. Dabas, P. A. Shegog, S. Ziegler, and M. Lambert, "Avocado (*Persea americana*) seed as a source of bioactive phytochemicals," *Current Pharmaceutical Design*, vol. 19, no. 34, pp. 6133–6140, 2013, doi: 10.2174/1381612811319340011.
- [14]. E. Segura-Campos, J. Chel-Guerrero, D. Betancur-Ancona, and G. Hernández-Álvarez, "Avocado seed: A potential source of functional ingredients," *Journal of Food Science*, vol. 79, no. 5, pp. C795–C803, 2014, doi: 10.1111/1750-3841.12449.

- [15]. M. Melgar, J. W. Dias, and R. L. De Moura Bell, "Biochemical characterization and potential valorization of avocado (*Persea americana*) seed and peel as byproducts of the oil industry," *Industrial Crops and Products*, vol. 122, pp. 669–679, 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.034.
- [16]. R. López-Cobo et al., "Characterization of polyphenolic compounds of avocado (*Persea americana* Mill.) seed extract using UHPLC-ESI-UHR-Qq-TOF-MS/MS," *Electrophoresis*, vol. 38, no. 15, pp. 1909–1916, 2017, doi: 10.1002/elps.201700031.
- [17]. R. Rodríguez-Carpena, M. Morcuende, and R. Estévez, "Avocado by-products as antioxidant and antimicrobial agents: Extract characterization and application in burgers," *Meat Science*, vol. 89, no. 1, pp. 150–158, 2011, doi: 10.1016/j.meatsci.2011.04.036.
- [18]. M. J. Orellana-Palma et al., "Microporous structure and adsorption capacity of avocado seed-derived activated carbons," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 319, art. 111007, 2021, doi: 10.1016/j.micromeso.2021.111007.
- [19]. S. A. Hosseini, S. T. Gholizadeh, and M. H. Rahmadian, "A review on pyrolysis of biomass and plastic wastes for production of bio-oil, biochar, and syngas," *Energy Conversion and Management*, vol. 241, art. 114279, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114279.
- [20]. C. Yin, "Microwave-assisted pyrolysis of biomass for bio-oil production: A review," *Energy*, vol. 236, art. 121438, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121438.
- [21]. A. Demirbas, "Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 72, no. 2, pp. 243–248, 2004, doi: 10.1016/j.jaap.2004.07.003.
- [22]. Y. Shen, S. Zhang, Y. Liu, J. Zhang, and H. Long, "Effect of temperature and residence time on the pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, art. 111509, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111509.
- [23]. S. Mohan, A. Sarswat, Y. S. Ok, and C. U. Pittman, "Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review," *Bioresource Technology*, vol. 160, pp. 191–202, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.01.120.
- [24]. J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, 2nd ed., Routledge, 2015, doi: 10.4324/9780203762264.
- [25]. A. V. Bridgwater, "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass," *Chemical Engineering Journal*, vol. 91, no. 2-3, pp. 87–102, 2003, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00128-1.
- [26]. J. Oasmaa and E. Kuoppala, "Fast pyrolysis of forestry residue. 2. Physicochemical composition of liquid products," *Energy & Fuels*, vol. 18, no. 3, pp. 690–696, 2004, doi: 10.1021/ef034066t.
- [27]. M. Lu, S. Zhou, and S. Liu, "Characterization and upgrade of bio-oil produced from biomass fast pyrolysis," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, no. 20, pp. 1835–1844, 2009, doi: 10.1080/15567030802628505.
- [28]. M. Mullen and A. V. Bridgwater, "The current and future role of thermochemical conversion of biomass in the bioeconomy," *Frontiers in Energy Research*, vol. 7, no. 1, 2019, Article 22, doi: 10.3389/fenrg.2019.00022.
- [29]. Pointing, S. B. (2001). Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(1-2), 20-33. DOI: 10.1007/s002530100745
- [30]. IKA-Werke GmbH & Co. KG, *Operating Instructions: Bomb Calorimeter C 6000*, Staufen, Germany: IKA, 2018.
- [31]. Kirk, T. K., & Farrell, R. L. (1987). Enzymatic "combustion": the microbial degradation of lignin. *Annual Review of Microbiology*, 41(1), 465-505. DOI: 10.1146/annurev.mi.41.100187.002341
- [32]. Sanchez, C. (2009). Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27(2), 185-194. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.001
- [33]. A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.
- [34]. M. T. García-Pérez et al., "Co-pyrolysis of polyethylene and pine sawdust: Influence of polyethylene molecular weight," *Fuel*, vol. 94, pp. 418–425, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.11.004.
- [35]. S. Wang, M. Ru, J. Dai, y H. Wang, "Synergistic effects of co-pyrolysis of biomass and plastics: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 344, art. 126223, 2022, doi:10.1016/j.biortech.2021.126223.

- [36]. Y. Jin, H. Han, X. Zhang, y H. Shen, "Upgrading of bio-oil via emulsion stabilization with surfactants and their mechanism," *Fuel Process. Technol.*, vol. 192, pp. 157–164, 2019, doi: 10.1016/j.fuproc.2019.04.008.
- [37]. A. B. Laird, R. C. Brown, y A. A. Acharjee, "Effects of pyrolysis temperature on product yields from fast pyrolysis of switchgrass," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 22, pp. 10618–10624, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.09.017.
- [38]. Y. Lu et al., "Characterization of heavy tar formation during pyrolysis of biomass at high heating rates," *Energy Fuels*, vol. 32, no. 6, pp. 6622–6630, 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b00867.
- [39]. M. S. Mettanan et al., "Characteristics of tar and particulate matters in biomass gasification: Impact of temperature and residence time," *Energy Convers. Manag.*, vol. 143, pp. 410–417, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.027.
- [40]. T. Bridgwater, "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass," *Chem. Eng. J.*, vol. 91, no. 2–3, pp. 87–102, 2003, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00142-0.
- [41]. X. Liu, Y. Zhu, X. Ruan, y J. Chen, "Characteristics of bio-oil from fast pyrolysis of rice husk in an entrained flow reactor," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 95, pp. 227–233, 2012, doi: 10.1016/j.jaap.2012.02.009.
- [42]. Z. Wang et al., "Effect of pyrolysis temperature on product yields and energy recovery from co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with plastics," *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 1323–1330, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.069.
- [43]. M. Fivga y A. Azapagic, "Evaluating the sustainability of bio-oil production from biomass: A review of techno-economic, environmental and social aspects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, pp. 1205–1225, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.019.