

## ANÁLISIS DE VOLÁTILES GENERADOS EN LA PIRÓLISIS ANALÍTICA DE RESIDUOS DE LA PLANTA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) DE INVERNADEROS AGRUPAR

### ANALYSIS OF VOLATILE COMPOUNDS GENERATED IN THE ANALYTICAL PYROLYSIS OF TOMATO PLANT (*Solanum lycopersicum*) WASTE FROM THE AGRUPAR GREENHOUSES

 **Sergio Homero Medina Romo, Ph. D.**

Universidad Central Del Ecuador

[smedina@uce.edu.ec](mailto:smedina@uce.edu.ec)

Quito, Ecuador

 **Gonzalo Chiriboga Gavidia, Ph. D.**

Universidad Central Del Ecuador

[wgchiriboga@uce.edu.ec](mailto:wgchiriboga@uce.edu.ec)

Quito, Ecuador

 **Washington Polivio Ruiz López, Mgtr.**

Universidad Central Del Ecuador

[wruiz@uce.edu.ec](mailto:wruiz@uce.edu.ec)

Quito, Ecuador

 **Alejandro Javier Delgado Araujo, Mgtr.**

Universidad Central Del Ecuador

[adelgado@uce.edu.ec](mailto:adelgado@uce.edu.ec)

Quito, Ecuador

#### ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Recibido: 31/01/2026

Aceptado: 04/09/2026

Publicado: 30/09/2026

### RESUMEN

La pirólisis se ha consolidado como una vía de valorización de residuos ampliamente investigada. En este contexto, la integración técnica de la termogravimetría (TGA) y la pirólisis analítica (Py-GC/MS) permite una caracterización exhaustiva de los subproductos, facilitando la evaluación de su potencial como fuente de energía y precursores de productos con alto valor añadido. El presente estudio constituye el primer análisis sistemático de los volátiles generados mediante pirólisis analítica de los residuos lignocelulósicos (tallos y hojas) de *Solanum lycopersicum*, cultivados en los invernaderos de la asociación AGRUPAR-QUITO, con el fin de determinar su aplicabilidad industrial. La metodología experimental contempló la ejecución de un análisis elemental y la determinación del análisis proximal por termogravimetría. Asimismo, se cuantificó el poder calorífico mediante la fórmula de Dulong y se obtuvo la composición química estructural de la biomasa a través de la deconvolución de curvas térmicas empleando el software Origin. La pirólisis analítica se realizó en el intervalo entre 100 - 800 °C. Se estudia la evolución de los

compuestos agrupados según sus grupos funcionales y la evolución de los compuestos mayoritarios de cada biomasa. Se concluye que la descomposición de la biomasa se inicia entre 300 - 400 °C. El mayor número de volátiles generados se alcanza entre 500 - 600 °C. La generación de ácidos orgánicos, cetonas, alcoholes y derivados de furano presenta un máximo alrededor de 500 °C. Alcanos, alquenos, derivados de benceno, fenol, pirrol y piridina se incrementan hasta 700 - 800 °C. Se generan ácido acético, neofitadieno, 1H-Indol. Se concluye que los residuos de la planta de tomate producen compuestos que tienen aplicación industrial.

**Palabras clave:** pirólisis analítica, biomasa vegetal, volátiles pirolíticos, grupos funcionales

---

## ABSTRACT

---

Pyrolysis is a waste valorization method that has been extensively researched. The combined analysis of results generated by thermogravimetry (TGA) and analytical pyrolysis (Py-GC/MS) enables the characterization of waste and the assessment of its potential as a source of energy and value-added products. In this study, we conducted a first-time analysis of the volatile elements produced during the analytical pyrolysis of tomato plant waste from the greenhouses of the AGRUPAR-QUITO association. The objective was to determine its industrial usefulness. Elemental and proximate analyses were conducted using thermogravimetry, and the calorific value was quantified using the Dulong formula. The chemical structure percentages of the biomass were obtained through deconvolution using Origin software. Analytical pyrolysis was performed at eight temperatures ranging from 100 to 800°C, allowing us to examine the evolution of compounds grouped by their functional groups, as well as the major compounds present in each biomass. The findings show that biomass decomposition begins between 300 and 400°C, with the most volatile compounds produced around 500 to 600°C. During this temperature range, pyrolytic compounds exhibit a wide range of molecular weights. The highest yield of organic acids, ketones, alcohols, and furan derivatives occurs near 500°C, while the production of alkanes, alkenes, benzene derivatives, phenols, pyrroles, pyridines, and other nitrogen-containing compounds increases with temperature up to 700 and 800°C. Notably, key compounds like acetic acid, neophytadiene, and 1H-indole are formed. Overall, we conclude that tomato plant residues generate compounds with potential industrial uses.

**Keywords:** analytical pyrolysis, plant biomass, pyrolytic volatiles, functional groups

## INTRODUCCIÓN

La generación de residuos alimenticios a nivel mundial es de aproximadamente 884 millones de toneladas al año (Banco Mundial, 2018). Cada año, se producen alrededor de 1000 t de

residuos provenientes de la agricultura (Sathish Kumar et al., 2024). En la ciudad de Quito, Ecuador, se generan alrededor de 1200 t/día de basura orgánica (Center for Clean Air Policy, 2017). La Municipalidad del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador (MDMQ), ha implementado, por medio de CONQUITO (agencia de promoción económica popular de Quito), el proyecto AGRUPAR, una iniciativa de Agricultura Urbana Participativa cuyo objetivo es promover la producción agroecológica (AGRUPAR, 2021). Se crearon 4400 invernaderos urbanos. En estos huertos urbanos se cultivan principalmente tomate, zucchini, brócoli, pepinillo, pimienta, entre otros. Se generan alrededor de 3 t/día de residuos vegetales durante el proceso de cultivo y cosecha (AGRUPAR, 2021).

La pirólisis como vía de valorización de residuos ha sido ampliamente investigada, utilizando diferentes equipos y métodos. Artículos de revisión recientes permiten tener una visión actualizada de esta tecnología (Jerzak et al., 2024; Vuppaladadiyam et al., 2023; Wang et al., 2020). La pirólisis analítica (Py-GC/MS) se utiliza para determinar qué tipo de volátiles, su composición y a qué temperatura se producen durante la pirólisis; esto permite conocer la estructura química de la biomasa vegetal y, principalmente, identificar qué compuestos de utilidad se pueden obtener a partir de los residuos estudiados.

Los residuos lignocelulósicos contienen hemicelulosa, celulosa y lignina como principales componentes, por lo que la pirólisis de estas fracciones aisladas ha sido ampliamente estudiada (Xu et al., 2020; Chen et al., 2019; Shen et al., 2013; Shen et al., 2010). En general, los residuos herbáceos de la horticultura han sido menos estudiados por medio de pirólisis, en comparación con los residuos leñosos. En este ámbito, Hidayat et al. (2018, pp. 9, 12-13) examinaron mediante pirólisis analítica (Py-GC/MS) la biomasa de *Imperata cylindrica*, una especie herbácea prevalente en el sudeste asiático. Los autores determinan que su elevado contenido de volátiles (72 %) la posiciona como una fuente energética viable bajo procesos termoquímicos. La caracterización identificó una matriz compleja de volátiles, incluyendo derivados furánicos, fenólicos (guaiacil, p-hidroxifenol), hidrocarburos aromáticos, compuestos cetónicos y ácidos orgánicos. Finalmente, determinaron que la eficiencia del proceso alcanza su rendimiento máximo de bioaceite (37 %) a una temperatura crítica de 500 °C.

De acuerdo con González Martínez et al. (2019), realizaron experimentos de Py-GC/MS para ocho tipos de biomasa lignocelulósica diferentes y agruparon los volátiles obtenidos en 3 familias químicas en función de su naturaleza: derivados fenólicos, de carbohidratos y de proteínas. Dentro del primer grupo, los metilfenoles se caracterizaron por presentar un máximo a 350 °C. En cuanto al grupo de derivados de carbohidratos, se identificaron 6 moléculas que se relacionan

directamente con la descomposición térmica de la hemicelulosa y la celulosa. Indol y metilindol fueron reportados como derivados de proteínas, presentes en todas las biomásas.

En una investigación técnica de alto impacto, Bu et al. (2011, p. 7004) emplearon la técnica Py-GC/MS sobre biomasa de pino de Oregón, utilizando carbón activado para evaluar la optimización de compuestos fenólicos. Los autores determinaron que, a una temperatura de 589 K y con una relación catalizador-biomasa de 3:1, se logran concentraciones excepcionales de fenol (38,9 %) y de compuestos fenólicos (66,9 %). La pirólisis catalítica, mediada por carbón activado, induce una descomposición selectiva de la macromolécula de lignina, lo que incrementa el rendimiento de ésteres y de biofenoles. Estos resultados permiten concluir que el producto obtenido es una materia prima tecnológica competitiva para su uso directo como combustible o como precursor esencial en la industria química.

La técnica Py-GC-MS también fue utilizada para investigar los mecanismos de la degradación térmica de la hemicelulosa, celulosa y lignina (Chen et al., 2019) y, en forma específica, para investigar los mecanismos de la pirólisis de la hemicelulosa y la formación de los principales gases y biocombustibles (Shen et al., 2010). Una nueva técnica fue propuesta para producir furfural a partir de biomasa lignocelulósica, impregnada con  $\text{ZnCl}_2$  como catalizador (Lu et al., 2011). Igualmente, se estudiaron los efectos de la tasa de calentamiento (100, 1000, 5000 y 10000 °C/s) sobre el comportamiento de la pirólisis rápida y la distribución de los productos de la planta Jerusalem Artichoke (plantas y flores nativas de Norteamérica) (Wang et al., 2019).

En el presente estudio se utilizaron los residuos vegetales (tallos y hojas) de la planta de tomate, provenientes de los invernaderos urbanos de AGRUPAR-Quito, para, mediante la técnica Py-GC-MS, determinar los tipos de volátiles que se generan y su posible utilidad en la industria en general.

## METODOLOGÍA

### Materiales

Se utilizaron residuos vegetales, tallos y hojas, de la planta de tomate, provenientes de invernaderos de la asociación AGRUPAR-Quito. Antes de su caracterización y pirólisis, la biomasa fue sometida a un proceso de secado y molienda.

Secado. El proceso de secado se realiza en una estufa a 105 °C durante 14 h, bajando su porcentaje de humedad desde un valor de 80 – 90 % (porcentaje de humedad al llegar del invernadero) en base húmeda, hasta la humedad de equilibrio.

Molienda. Se realiza en un molino de corte marca Retsch SM300, dotado de un tamiz con luz de malla de 1,5 mm a 700 rpm. Se obtiene un tamaño promedio de partícula de 0,814 mm.

## Métodos

Análisis Elemental. La composición de C, N, H y S se determina mediante el Analizador Elemental CHSN TM FlashSmart. Tomando en cuenta los porcentajes de cenizas y la humedad de equilibrio de la muestra, se determina por diferencia el porcentaje de oxígeno.

Análisis proximal. Se realiza el análisis termogravimétrico (TGA) de la biomasa en una termobalanza Mettler-Toledo TGA-1, con el objetivo de determinar su contenido en humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas. Se inicia el proceso a 30 °C con una velocidad de calefacción de 20 °C min<sup>-1</sup> hasta alcanzar los 100 °C en presencia de un flujo de N<sub>2</sub> de 80 mL min<sup>-1</sup>, y se mantiene esta temperatura durante 15 min. Finalizado este tiempo, a la misma velocidad de calefacción y con el mismo flujo de N<sub>2</sub>, se alcanzaron los 700 °C. En este punto, se sustituye la atmósfera de N<sub>2</sub> por un flujo de aire de 80 mL min<sup>-1</sup>, manteniendo la temperatura durante 20 min.

Poder Calorífico. Se calculó el Poder Calorífico Superior (HHV) mediante la expresión propuesta por Dulong:

$$PCS = 337,3C + 1418,9 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 93,1S + 23,3N \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Donde C, H, O, N, S constituyen sus respectivos porcentajes en la muestra.

Análisis Químico. Para la determinación de los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina, se transforman inicialmente los resultados del análisis termogravimétrico (TGA) en curvas de termogravimetría derivada (DTG), las cuales representan la variación de la masa en función del tiempo. Con el objetivo de aislar el área de degradación de estos biopolímeros, se depuran los datos eliminando las señales correspondientes al hombro de humedad y a las pérdidas de peso registradas por encima de los 550 °C. Finalmente, mediante un proceso de deconvolución de las curvas térmicas empleando el software ORIGIN, se calculan los porcentajes aproximados de estas fracciones estructurales, facilitando así la caracterización química de la biomasa.

Pirólisis Analítica (EGA/Py-GC/MS). Para este análisis se utilizó un equipo pyroprobe (Py), de la casa Agilent Technologies, modelo EGA/PY 3030D. Este equipo consta de un reactor de tamaño muy reducido, en el cual tiene lugar la pirólisis de la muestra. Los gases que se generan en este proceso pasan a un cromatógrafo de gases (GC) conectado en serie al reactor, en donde se separan los diferentes compuestos gaseosos, y finalmente estos gases separados entran a un espectrómetro de masas (MS), en donde son identificados.

Se realizaron ensayos por duplicado, a distintas temperaturas: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 °C. El tiempo total del análisis de los volátiles fue de 30 min. La cantidad de muestra introducida en cada experimento fue aproximadamente de 0,25 mg de biomasa, pesada en una microbalanza XS205 Dual Range de Mettler Toledo, cuya precisión es de 0,01 mg.

La interpretación de los cromatogramas extraídos del equipo se llevó a cabo mediante el software MassHunter Qualitative Analysis Navigator de la compañía Agilent Technologies. Las bibliotecas espectrales empleadas para la identificación de los compuestos fueron NIST 08 y WILEY 275.

## RESULTADOS

### Caracterización de la Biomasa

En la Tabla 1 se observan los resultados de la caracterización de los residuos de la planta de tomate.

**Tabla 1**

*Caracterización de la Biomasa de la Planta de Tomate (base seca)*

| <b>PARÁMETRO</b>                  | <b>VALOR</b> | <b>UNIDAD</b>       |
|-----------------------------------|--------------|---------------------|
| <b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>         |              | %w/w                |
| C                                 | 37.7         | %                   |
| N                                 | 3.9          | %                   |
| H                                 | 2.9          | %                   |
| O*                                | 26.3         | %                   |
| S                                 | 1.7          | %                   |
| <b>ANÁLISIS PROXIMAL(TGA)</b>     |              | %w/w                |
| Humedad de equilibrio             | 6.6          | %                   |
| Volátiles                         | 58.4         | %                   |
| Carbono fijo                      | 14.1         | %                   |
| Cenizas                           | 20.9         | %                   |
| <b>ANÁLISIS QUÍMICO</b>           |              |                     |
| Celulosa                          | 17.9         | %                   |
| Hemicelulosa                      | 66,5         | %                   |
| Lignina                           | 15.6         | %                   |
| <b>PROPIEDADES</b>                |              |                     |
| Poder calorífico Superior (PCS)** | 12.4         | MJ kg <sup>-1</sup> |
| Tamaño de partícula (promedio)    | 0,814        | mm                  |

*Nota.* \*Obtenido restando los porcentajes de C, H, N, S, cenizas y humedad de equilibrio del 100%. \*\*Obtenido a partir de la ecuación de Dulong.

## Pirólisis Analítica (EGA)

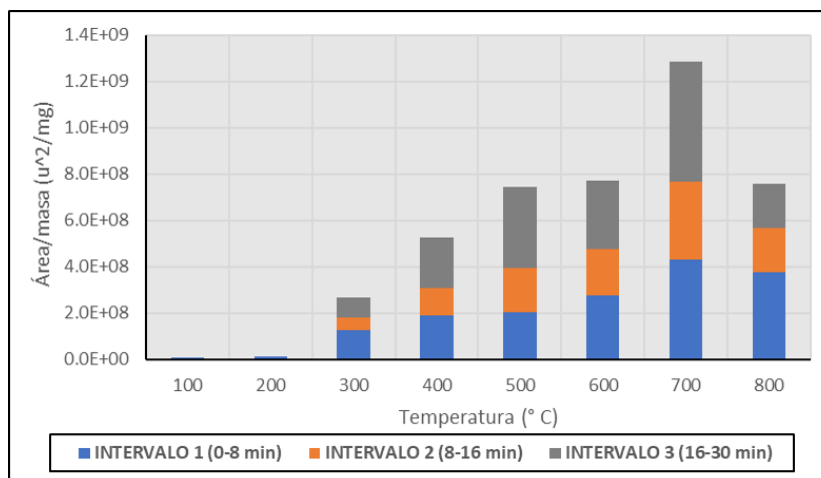
Esta técnica se empleó para analizar los volátiles generados por pirólisis analítica a diferentes temperaturas. Se realizaron experimentos en el intervalo 100-800 °C. Los resultados que se obtienen de cada experimento permiten estructurar un listado de compuestos detectados a cada temperatura, así como el valor del área cromatográfica de cada compuesto, el cual está relacionado con su rendimiento.

En este estudio, se obtuvieron más de 200 compuestos. De todos ellos se seleccionaron aquellos que tenían un porcentaje de similitud igual o superior al 80 % con los espectros de las librerías. Las áreas cromatográficas de cada compuesto se dividieron entre la masa de muestra utilizada en cada experimento, para que las comparaciones fueran intensivas (independientes de la masa). Para la discusión de estos resultados, se han realizado diferentes agrupaciones de los compuestos detectados siguiendo diferentes criterios, que permiten analizar la evolución de los compuestos. Se detalla a continuación cada uno de estos criterios de análisis.

Evolución de los volátiles. El tiempo total (30 min) de cada cromatograma se ha dividido en tres intervalos, 0-8 min (A1), 8-16 min (A2) y 16-30 min (A3), sumando el área cromatográfica de todos los compuestos que aparecen en cada una de ellas. En el primer intervalo aparecen los compuestos más ligeros, con peso molecular inferior a 100. A medida que avanza el tiempo de retención, los compuestos tienen mayor peso molecular. La Figura 1 muestra la evolución de los volátiles totales (área total/masa) para cada intervalo y para cada temperatura.

**Figura 1**

*Volátiles Totales por Intervalos a cada Temperatura de Pirólisis*

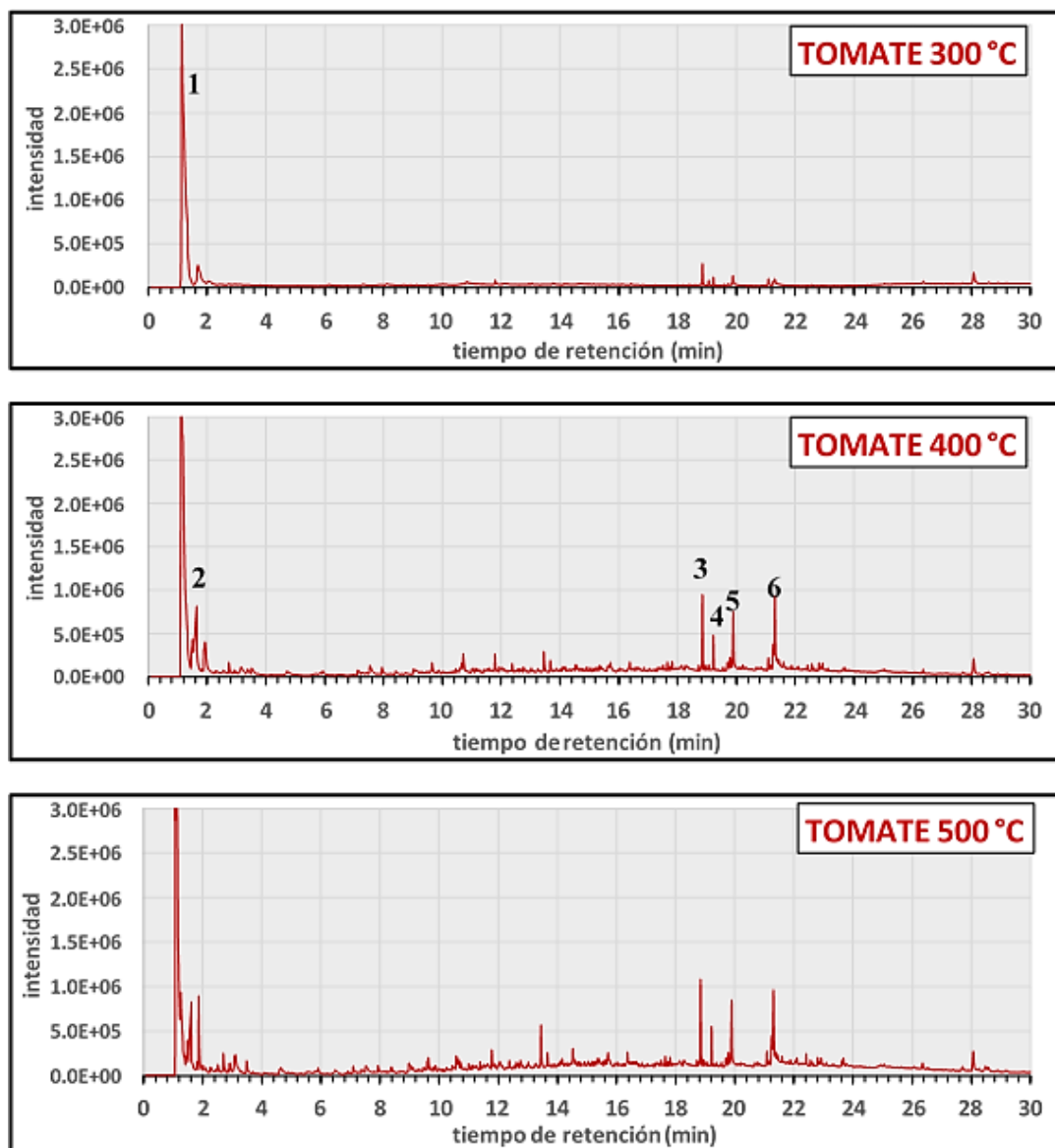


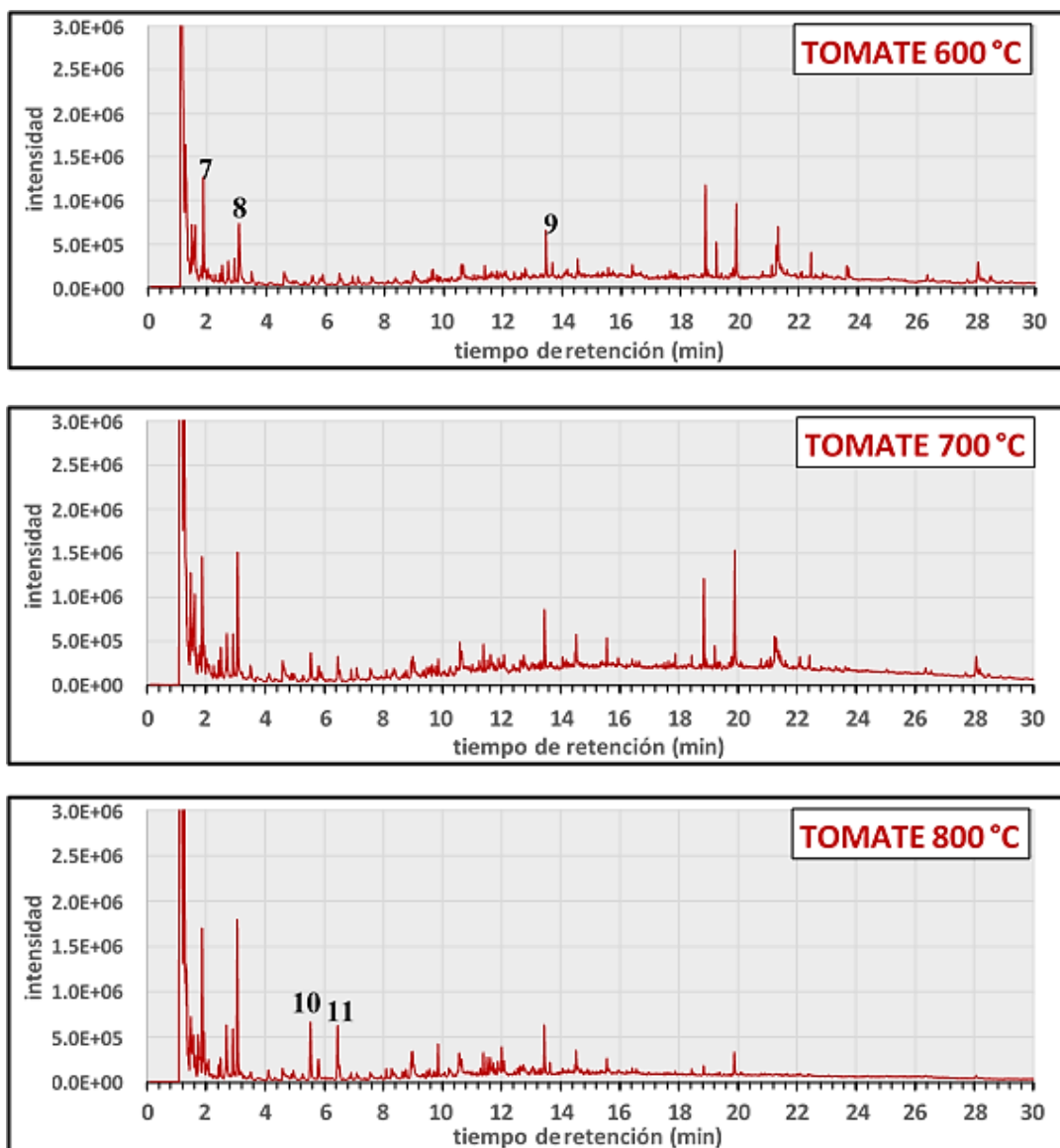
*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Análisis cualitativo de los cromatogramas. Se analizan los pirogramas a cada temperatura, con el propósito de observar la evolución de los compuestos en los volátiles obtenidos. En la Figura 2 se muestran los pirogramas en el intervalo de 300 – 800 °C. Los pirogramas obtenidos a 100 y 200 °C no se han incluido en la figura ya que únicamente muestran el pico correspondiente al agua (#1) proveniente de la deshumidificación de la biomasa. Se han numerado los picos más significativos detectados en cada temperatura.

**Figura 2**

*Cromatogramas de los volátiles obtenidos en el intervalo de 300-800 °C*



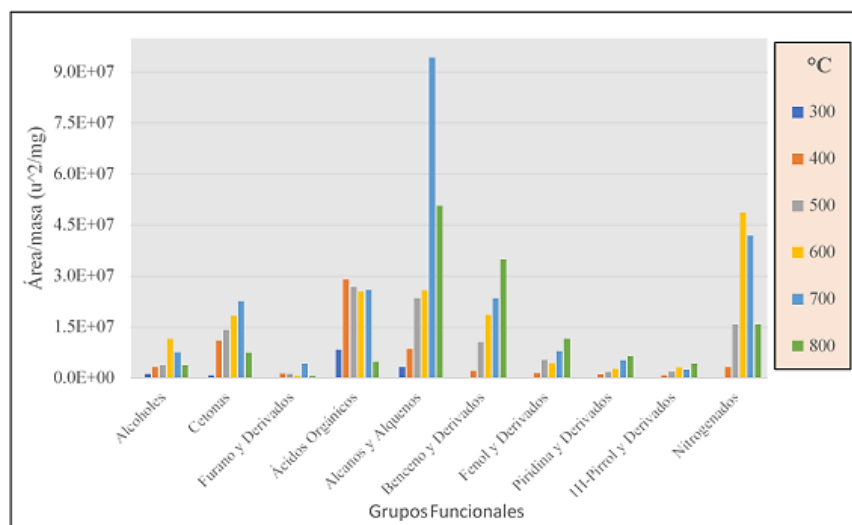


Nota. Fuente: Elaboración propia.

Evolución de los grupos funcionales. Los volátiles detectados se han agrupado por familias de acuerdo con el grupo funcional principal que contienen. Para este análisis, se han seleccionado los siguientes grupos: en primera instancia, aquellos derivados de la degradación de carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) como ácidos orgánicos, cetonas, alcoholes y furano y derivados; y en segunda instancia, los compuestos vinculados a la descomposición de la lignina y proteínas, tales como alcanos y alquenos, benceno y derivados, fenol y derivados, piridina y derivados, 1H-pirrol y derivados y otros compuestos nitrogenados. La Figura 3 muestra la suma de las áreas normalizadas ( $\mu^2/\text{mg}$  muestra) de los compuestos identificados pertenecientes a cada una de estas familias y para cada temperatura de pirólisis.

### Figura 3

*Evolución de los grupos funcionales con la temperatura*

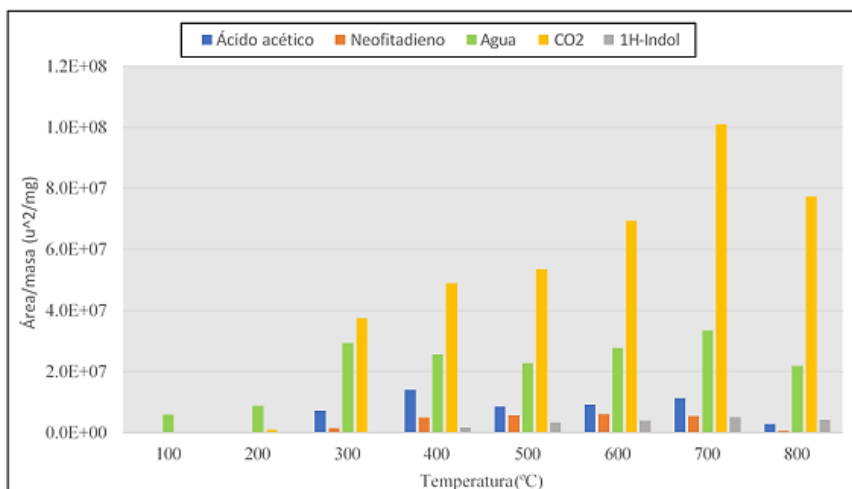


*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Evolución de algunos compuestos característicos. La Figura 4 presenta la evolución del rendimiento (área/masa) de algunos compuestos que han alcanzado valores de área significativos en la pirólisis de la biomasa estudiada en este trabajo o bien presentan un valor añadido por sus aplicaciones industriales. Se han seleccionado CO<sub>2</sub>, agua (componente mayoritario), ácido acético, neofitadieno, limoneno e indol (aplicación industrial).

### Figura 4

*Evolución de algunos compuestos característicos con la temperatura*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

## DISCUSIÓN

### Caracterización de la Biomasa

A partir de la Tabla 1, se realizan los siguientes análisis: Tripathi et al. (2016), obtuvieron un 48,5 % en promedio de carbono del análisis de 10 biomásas de madera y un 46,82 % en promedio de carbono del análisis de 15 biomásas de agricultura. En el presente estudio se observa que el porcentaje de carbono es de 37,7 %, un porcentaje relativamente menor, considerando que son residuos no leñosos (tallos y hojas).

Vassilev et al. (2010) presentan una revisión de la composición química de 86 tipos distintos de biomasa. En esta referencia es difícil encontrar residuos lignocelulósicos con un porcentaje de N similar al de la biomasa del presente trabajo. Entre las biomásas leñosas el valor máximo es 0,7 %, mientras que en las herbáceas el valor más alto se encuentra en la planta de pimiento con 3,2 % (valor expresado en base libre de cenizas y humedad). La presencia de clorofila en las hojas de las plantas puede contribuir al aumento del contenido de N en este tipo de residuos. Font et al. (2009), obtuvieron los siguientes resultados de la composición elemental en base seca de la planta de tomate, C, 38,3 %; H, 5,2 %; N, 2,7 %; S, 1,1 %; O, 41,1 %, resultados que coinciden en mayor medida con los del presente estudio.

De los resultados del análisis proximal se puede observar que, la humedad de equilibrio es del 6,6 %, siendo un porcentaje adecuado para el proceso de pirólisis. Los volátiles con el 58,4 % constituyen la mayor fracción, en concordancia con su estructura no leñosa. Font et al. (2009), en su estudio sobre la cinética de pirólisis y combustión de la planta de tomate, obtuvieron 11,6 % de cenizas. Llorach-Massana et al. (2017), determinaron entre el 8 % y 15 % el porcentaje de cenizas en tallos de tomate y entre el 18 % y 23 % en hojas de tomate. Apaydin-Varol y Pütün (2012) en su estudio sobre la caracterización de biocarbones producidos a partir de distintas biomásas vegetales, obtuvieron en los tallos de maíz (biomasa no leñosa y similar a la del presente estudio), humedad del 8,1 %, cenizas 10,8 %, volátiles 67,4 %, carbón fijo (por diferencia) 13,8 %, valores similares a los del presente estudio.

La hemicelulosa es el componente mayoritario (66,5%), justificando la mayor producción de volátiles. Font et al. (2009), en su estudio sobre la planta de tomate, determinaron los siguientes valores para la hemicelulosa, celulosa y lignina: 28,8 %, 39,1 % y 12,1 % respectivamente; mientras que, Llorach-Massana et al. (2017), determinaron los valores de 8,20 %, 28,8 % y 19,7 % para los tallos de planta de tomate y 3,2 %, 13,7 % y 6,1 % para las hojas de la misma planta. Como se puede observar, los resultados de estos autores difieren de los obtenidos en

este estudio por deconvolución de la curva DTG utilizando el programa ORIGIN. En el método de deconvolución la base total es la suma de los tres componentes, en cambio, en los estudios mencionados, la base es el total de las biomásas, por esta razón sus porcentajes no suman el 100% (Medina et al., 2023).

Rojas y Flores (2019), en su estudio sobre Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis, determinan los poderes caloríficos de más de 50 residuos de frutas, donde destacan los PC de la cáscara de naranja, cáscara de coco y cáscara de piña, con valores de 19,34; 19,89 y 18,48 MJ kg<sup>-1</sup> respectivamente. Estos valores son relativamente superiores a los determinados para la biomasa del presente estudio (12,4 MJ kg<sup>-1</sup>).

### **Pirólisis Analítica (EGA)**

Evolución de los volátiles. En la Figura 1 se observa que los compuestos que conforman el grupo A1 ya aparecen desde los 300 °C. En este grupo se encuentran compuestos como el agua (que ya se observa a 100 – 200 °C, al eliminarse la humedad que contienen las muestras) y el CO<sub>2</sub>. Estos compuestos son principalmente productos de la descomposición de la hemicelulosa y parte de la celulosa. Su producción aumenta al incrementar la temperatura de pirólisis, tanto por la mayor descomposición de las fracciones del sólido como por la aparición, a altas temperaturas (700 – 800 °C), de compuestos ligeros producto del craqueo de moléculas más pesadas. El aumento de estos compuestos con la temperatura es prácticamente lineal en el intervalo de temperaturas estudiado. Los compuestos del grupo A1 son los más abundantes y además de agua y CO<sub>2</sub>, incluyen ácidos orgánicos, alcoholes y cetonas e hidrocarburos de cadena corta. Esto coincide con los resultados obtenidos por Wang et al. (2019) en su estudio de descomposición por TG-FTIR del tallo de la alcachofa de Jerusalén, en el que concluyen que los compuestos mayoritarios obtenidos son ácidos, fenólicos y carbonílicos.

Con respecto al grupo A2, se observa que los compuestos empiezan a aparecer a los 300 °C y presentan un incremento significativo, con una pendiente pronunciada, hasta los 500 °C. A partir de esta temperatura, la generación de los compuestos de este grupo, en general, se estabiliza, pudiendo disminuir ligeramente a temperaturas altas por su posible craqueo, contribuyendo así al incremento de los compuestos del grupo A1. En general, este grupo está constituido por moléculas de cadena más larga que las del grupo anterior, como son cetonas, aldehídos y ácidos orgánicos con radicales, así como algunos compuestos aromáticos, como el indol.

Los compuestos del grupo A3, inician su producción a los 400 °C de una manera intensa. Son moléculas más pesadas, cuyo rendimiento máximo se observa alrededor de los 600-700 °C, disminuyendo claramente a temperaturas más altas debido a su craqueo, generando moléculas más ligeras. A este grupo corresponden alcanos y alquenos de cadena larga y aromáticos pesados provenientes de la lignina que, al craquearse, formarán aromáticos de cadena más corta, que aparecen a un tiempo de retención menor (Bu et al., 2011; Chen et al., 2019).

Análisis cualitativo de los cromatogramas. De la Figura 2 se observa que a partir de los 300 °C se inicia la descomposición de la biomasa, apareciendo nuevos picos en los cromatogramas todavía poco intensos. A 400 °C, la descomposición de la biomasa ya es notable. Se detectan otros picos con rendimientos altos: ácido acético (#2); neofitadieno (#3); 1-metil-4-(1-metiletenil) ciclohexeno (#4); ácido hexadecanoico (#5); 9,12,15-ácido octadecatrienoico (#6). A 500 °C y 600 °C, las intensidades aumentan especialmente en la zona de los compuestos más ligeros a tiempos de retención más bajos. Se evidencian con mayor intensidad 3 compuestos: 2-propano-1-hidroxilo (#7), tolueno (#8) y el 1-H-Indol (#9). A 700 y 800 °C se aprecia notablemente el craqueo de los compuestos pesados y el incremento de los más ligeros. En general, los compuestos se agrupan en tiempos de retención más pequeños y, a 800 °C, casi no existen picos a tiempos mayores de 16 min. Disminuye la intensidad de los compuestos 3, 4, 5 y 6. En contraposición, aparecen el etilbenceno (#10) y el estireno (#11), y continúa aumentando la intensidad del tolueno (#8).

Aunque CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O son los compuestos con notable intensidad en todos los experimentos, existen otros compuestos que aparecen desde los 300 °C y permanecen con mayor o menor intensidad hasta temperaturas altas (ácido acético, neofitadieno, ácido hexadecanoico, limoneno, 1-H-indol, tolueno, 2-propano-1-hidroxilo).

Evolución de los grupos funcionales. De la Figura 3 se observa que ninguno de estos grupos se detecta a una temperatura inferior a 300 °C. De acuerdo con Shen et al. (2013), la pirólisis de un residuo lignocelulósico por debajo de los 300 °C sólo produce una disminución del grado de polimerización de la celulosa y hemicelulosa, dando origen a radicales libres, grupos carbonilo, carboxilo e hidroperóxidos; se elimina agua al mismo tiempo que se empiezan a desprender pequeñas cantidades de monóxido y de dióxido de carbono, dejando al residuo parcialmente carbonizado.

Como se observa en la Figura 3, los grupos alquenos y alcanos, derivados del benceno, fenol, piridina, pirrol y, en menor medida, los compuestos nitrogenados aumentan su intensidad hacia

las temperaturas más altas. En cambio, los grupos de alcoholes, ácidos orgánicos, cetonas y derivados del furano comienzan su producción a temperaturas más bajas, disminuyendo a temperaturas altas, bien por su descomposición en moléculas más ligeras o por verse favorecidos por otro tipo de mecanismos.

De acuerdo con Chen et al. (2018), Chen et al. (2019) y Zhao et al. (2014), la formación de alquenos y alcanos ocurre principalmente durante la degradación térmica de la lignina. Este proceso se fundamenta en la rotura de los enlaces arilo-OR y en sucesivas reacciones de deshidroxilación del anillo benceno, mecanismos que explican por qué el rendimiento de estos compuestos aumenta proporcionalmente con la temperatura. Por otro lado, Shen et al. (2013) sostiene que la descomposición de la hemicelulosa y la celulosa en medios básicos o neutros genera compuestos carbonílicos, ácidos y lactonas. Dicha reacción se desencadena por la eliminación primaria del grupo O-acetilo en la cadena de xilano, lo que justifica su aparición a temperaturas de pirólisis más bajas en comparación con otros volátiles. Asimismo, se ha determinado que mientras las matrices alcalinas y neutras favorecen la liberación de ácidos y lactonas, la formación de furanos se ve beneficiada bajo condiciones ácidas y neutrales.

Los alcanos y alquenos junto a los compuestos nitrogenados son los de mayor producción. Las cetonas, ácidos orgánicos, benceno y derivados tienen una producción media. Las producciones más bajas corresponden a los alcoholes, furano y derivados, fenol y derivados, piridina y derivados, 1H-pirrol y derivados. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Wang et al. (2019) en su estudio realizado sobre la descomposición del tallo de la Jerusalem artichoke, donde los grupos funcionales mayoritarios fueron los compuestos carbonílicos y los ácidos orgánicos.

En general, todos los compuestos pertenecientes a estos grupos funcionales tienen muchas aplicaciones en la industria de alimentos (ácidos orgánicos, compuestos nitrogenados), en la producción de combustibles (alquenos, alcanos, alcoholes), en la industria textil (benceno y derivados, fenol y derivados) y otros sectores de la producción. En forma específica, por ejemplo, el grupo de la piridina es utilizado en la síntesis de fármacos, insecticidas, herbicidas y en el tinturado de textiles, y el grupo 1H-pirrol se utiliza principalmente como precursor en la industria farmacéutica.

Evolución de algunos compuestos característicos. Como se observa en la Figura 4, el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O, son los compuestos más abundantes a cualquier temperatura, superando en un factor

de 10 a los siguientes compuestos. El CO<sub>2</sub>, se produce a partir de los 300 °C y va en aumento casi en forma lineal hasta los 700 °C.

El H<sub>2</sub>O ya se encuentra inicialmente en la biomasa como agua ligada y se libera por calentamiento en forma de vapor desde temperaturas iniciales del proceso, pero su rendimiento crece hasta los 400 °C debido al proceso de pirólisis y permanece relativamente constante hasta los 800 °C. Estos compuestos se forman por las reacciones de descarboxilación y deshidratación que tienen lugar durante el proceso de descomposición de la biomasa, bien directamente a partir del sólido o bien a partir de compuestos intermedios generados durante el proceso (Shen et al., 2010; Ansari et al., 2019; Vikram et al., 2021).

El ácido acético se forma a partir de los 300 °C, alcanzando su máximo pico entre los 400 – 500 °C. Se forma principalmente a partir de la descomposición de la hemicelulosa, por la rotura de los grupos O-acetil (Chen et al., 2019). A temperaturas más altas, disminuye su producción, debido a que las reacciones de formación de los ácidos son menos competitivas a elevadas temperaturas y los ya formados se craquean a moléculas más livianas (Shen et al., 2010).

El neofitadieno, alqueno ramificado de cadena larga (C<sub>20</sub>H<sub>38</sub>), también presenta un máximo entre 400 – 600 °C, casi desapareciendo a 800 °C, ya que se craquea en volátiles más ligeros. Se trata de un pigmento natural presente en una amplia variedad de frutas y verduras, especialmente en verduras de hojas verdes y tomates. Cabe destacar la investigación de Shi et al. (2019) en vegetales afectados por la mosca blanca, en la que concluyeron que la presencia del neofitadieno en los vegetales ayuda en la detección y manejo de estas plagas. El indol (C<sub>8</sub>H<sub>7</sub>N), compuesto orgánico heterocíclico, inicia su producción a los 400 °C y aumenta su rendimiento con la temperatura.

## CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo la pirólisis analítica de los residuos de la planta de tomate, cultivada en los invernaderos de la Asociación AGRUPAR, en el intervalo de temperaturas de 100 – 800 °C, analizando la evolución de los volátiles generados.

El componente mayoritario en la biomasa es la hemicelulosa con un 66,5 % (en base seca y libre de compuestos inorgánicos). Su poder calorífico superior de 12,4 MJ kg<sup>-1</sup> es relativamente menor respecto al de otras biomásas vegetales.

De los pirogramas obtenidos en la pirólisis analítica de este residuo, se puede concluir que la descomposición de la biomasa se inicia entre 300 – 400 °C. El máximo número de volátiles

generados alcanza alrededor de 500 – 600 °C, donde los compuestos cubren un amplio rango de pesos moleculares. A temperaturas superiores (700 – 800 °C) se favorece la formación de moléculas más ligeras, y los volátiles se concentran a tiempos de retención más cortos.

Se generan ácidos orgánicos, cetonas, alcoholes y derivados de furano; alcanos y alquenos, derivados de benceno, así como también fenol, pirrol y piridina y otros compuestos nitrogenados.

Aunque el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el agua (H<sub>2</sub>O) constituyen los productos volátiles mayoritarios en todos los rangos térmicos estudiados, destaca la identificación mediante pirólisis analítica de sustancias de alto valor añadido como el ácido acético, el neofitadieno y el 1H-indol, las cuales poseen una relevancia significativa en aplicaciones industriales.

En consecuencia, se concluye principalmente que el presente estudio permitió determinar por primera vez, que los residuos lignocelulósicos de *Solanum lycopersicum* representan una materia prima versátil con potencial de valorización dual: como fuente de energía y como precursores químicos esenciales para la industria farmacéutica y de agroquímicos.

Se recomienda realizar estudios sobre el potencial como combustible de los volátiles, de los compuestos condensables, así como del biocarbón producidos en la pirólisis de esta biomasa, con el fin de tener resultados completos de su poder calorífico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRUPAR. (2021). *Invernaderos urbanos y suburbanos Quito*. [Documento informativo]. <https://interlace-hub.com/es/quito-y-su-agricultura-urbana-agrupar>
- Ansari, K. B., Arora, J. S., Chew, J. W., Dauenhauer, P. J. y Mushrif, S. H. (2019). Fast Pyrolysis of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin: Effect of Operating Temperature on Bio-oil Yield and Composition and Insights into the Intrinsic Pyrolysis Chemistry. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(35), 15838–15852. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00920>
- Apaydin-Varol, E. y Pütün, A. E. (2012). Preparation and characterization of pyrolytic chars from different biomass samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 98, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.07.001>
- Banco Mundial. (2018). *Desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

- Bu, Q., Lei, H., Ren, S., Wang, L., Holladay, J., Zhang, Q., Tang, J. y Ruan, R. (2011). Phenol and phenolics from lignocellulosic biomass by catalytic microwave pyrolysis. *Bioresource Technology*, 102(13), 7004–7007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.025>
- Center for Clean Air Policy. (2017). *Estudio de basura en Quito*. [Reporte Informativo Municipio de Quito, documento no recuperable]. <https://www.ccacoalition.org/es/partners/center-clean-air-policy-ccap>
- Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X. y Ma, Z. (2018). Investigation of biomass torrefaction based on three components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Conversion and Management*, 169, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.063>
- Chen, W. H., Wang, C. W., Ong, H. C., Show, P. L. y Hsieh, T. H. (2019). Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*, 258, 116168–116181. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116168>
- Font, R., Moltó, J., Gálvez, A. y Rey, M. D. (2009). Kinetic study of the pyrolysis and combustion of tomato plant. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1–2), 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.026>
- González Martínez, M., Ohra-aho, T., Tamminen, T., da Silva Perez, D., Campargue, M. y Dupont, C. (2019). Detailed structural elucidation of different lignocellulosic biomass types using optimized temperature and time profiles in fractionated Py-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.02.011>
- Hidayat, S., Abu Bakar, M. S., Yang, Y., Phusunti, N. y Bridgwater, A. V. (2018). Characterisation and Py-GC/MS analysis of Imperata Cylindrica as potential biomass for bio-oil production in Brunei Darussalam. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.07.018>
- Jerzak, W., Acha, E. y Li, B. (2024). Comprehensive review of biomass pyrolysis: conventional and advanced technologies, reactor designs, product compositions and yields, and techno-economic analysis. *Energies*, 17, 5082. <https://doi.org/10.3390/en17205082>
- Llorach-Massana, P., Lopez-Capel, E., Peña, J., Rieradevall, J., Montero, J. I. y Puy, N. (2017). Technical feasibility and carbon footprint of biochar co-production with tomato plant

- residue. *Waste Management*, 67, 121–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.021>
- Lu, Q., Dong, C. Q., Zhang, X. M., Tian, H. Y., Yang, Y. P. y Zhu, X. F. (2011). Selective fast pyrolysis of biomass impregnated with ZnCl<sub>2</sub> to produce furfural: Analytical Py-GC/MS study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 90(2), 204–212.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.12.007>
- Medina, S. H. (2023). *Producción de biocarbón por pirólisis lenta a partir de biomasa residual de invernaderos urbanos y su aplicación en la mejora de la productividad de los mismos*. Ph.D. [tesis doctoral. Universidad de Alicante].  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=365029>
- Rojas, A. y Flores, C. (2019). Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis. *Revista Politécnica*, 15, 42–53. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a4>
- Sathish Kumar, R.K., Sasikumar, R. y Dhilipkumar, T. (2024). Exploiting agro-waste for cleaner production: A review focusing on biofuel generation, bio-composite production, and environmental considerations. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140536.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140536>
- Shen, D. K., Gu, S. y Bridgwater, A. V. (2010). Study on the pyrolytic behaviour of xylan-based hemicellulose using TG-FTIR and Py-GC-FTIR. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 87(2), 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.12.001>
- Shen, D., Xiao, R., Gu, S. y Zhang, H. (2013). *The Overview of Thermal Decomposition of Cellulose in Lignocellulosic Biomass*. Cellulose - Biomass Conversion.  
<https://doi.org/10.5772/51883>
- Shi, X., Preisser, E. L., Liu, B., Pan, H., Xiang, M., Xie, W., Wang, S., Wu, Q., Li, C., Liu, Y., Zhou, X. y Zhang, Y. (2019). Variation in both host defense and prior herbivory can alter plant-vector-virus interactions. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2178-z>
- Tripathi, M., Sahu, J. N. y Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. y Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>

- Vikram, S., Rosha, P. y Kumar, S. (2021). Recent modeling approaches to biomass pyrolysis: A review. *Energy and Fuels*, 35(9), 7406–7433. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00251>
- Vuppaladadiyam, A. K., Vuppaladadiyam, S. S. V., Sikarwar, V. S., Ahmad, E., Pant, K. K., Murugavelh, S., Pandey, A., Bhattacharya, S., Sarmah, A. y Leu, S. Y. (2023). A critical review on biomass pyrolysis: reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236>
- Wang, B., Xu, F., Zong, P., Zhang, J., Tian, Y. y Qiao, Y. (2019). Effects of heating rate on fast pyrolysis behavior and product distribution of Jerusalem artichoke stalk by using TG-FTIR and Py-GC/MS. *Renewable Energy*, 132, 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.021>
- Wang, G., Dai, Y., Yang, H., Xiong, Q., Wang, K., Zhou, J., Li, Y. y Wang, S. (2020). A review of recent advances in biomass pyrolysis. *Energy & Fuels*, 34, 15557–15578. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03107>
- Xu, F. X., Zhang, X., Zhang, F., Jiang, L. Q., Zhao, Z. L. y Li, H. B. (2020). TG-FTIR for kinetic evaluation and evolved gas analysis of cellulose with different structures. *Fuel*, 268, 117365. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117365>
- Zhao, J., Xiuwen, W., Hu, J., Liu, Q., Shen, D. y Xiao, R. (2014). Thermal degradation of softwood lignin and hardwood lignin by TG-FTIR and Py-GC/MS. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.06.006>

## Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los actores involucrados que contribuyeron al desarrollo de la presente investigación.

## Financiamiento

No aplica.

## Conflictos de interés

No existe conflicto de intereses.

## Contribución de los autores

SMR, GCG, WRL, ADA: conceptualización, análisis formal, investigación, redacción – borrador

original, y redacción – revisión y edición.

### **Declaraciones éticas**

No aplica.