

Tecnología de microondas rápida, sencilla y eficiente: fundamentos y aplicaciones en la despolimerización de la lignina.

Rapid, simple, and efficient microwave technology: fundamentals and applications in lignin depolymerization.

Karen López Camas* (1).

Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta,
Edmonton, Alberta, Canada T6G 2P5.

Klopezca@ualberta.ca.

Aman Ullah (2). Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta,
Edmonton, Alberta, Canada T6G 2P5. Ullah2@ualberta.ca.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2025; aceptado en octubre 09, 2025.

Resumen.

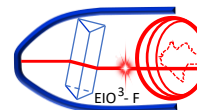
El presente proyecto pretende dar un panorama acerca del uso de microondas como fuente de calentamiento en reacciones químicas, en particular, su uso en la despolimerización de la lignina para poder obtener moléculas de masa molecular y polidispersidad reducida comparadas con la lignina sin modificar. Las técnicas convencionales de despolimerización de la lignina requieren condiciones severas y un alto consumo energético, lo que impulsa la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este trabajo se evaluó la despolimerización de lignina Kraft asistida por microondas mediante isopropanol y ácido fórmico como medios de reacción. El calentamiento por microondas permite una transferencia directa de energía al material mediante la interacción con los dipolos moleculares, lo que aumenta la eficiencia térmica y reduce significativamente los tiempos de reacción.

Palabras claves: Despolimerización, lignina, microondas.

Abstract.

This project aims to provide an overview of the use of microwaves as a heating source in chemical reactions, particularly their use in lignin depolymerization to obtain molecules with reduced molecular weight and polydispersity compared to unmodified lignin. Conventional lignin depolymerization techniques require harsh conditions and high energy consumption, prompting the search for more sustainable alternatives. This work evaluated microwave-assisted depolymerization of Kraft lignin using isopropanol and formic acid as the reaction media. Microwave heating allows direct energy transfer to the material through interaction with molecular dipoles, resulting in greater thermal efficiency and significantly reduced reaction times.

Keywords: Depolymerization, lignin, microwaves.



1. Descripción de la conferencia.

Durante las últimas décadas el uso de radiación de microondas como método de calentamiento en reacciones químicas se ha popularizado debido a su calentamiento de alta eficacia comparada con métodos de calentamiento convencionales. Una de las grandes ventajas y lo cual ha popularizado ampliamente el uso del microondas tanto en academia como en la industria es la drástica reducción de tiempos de reacción, de reacciones que podrían tomar días o horas son reducidas a minutos y segundos (Kappe & Dallinger, 2006). A diferencia de métodos convencionales de calentamiento, con el microondas se pueden calentar sustancia mediante transferencia de energía por lo que las radiaciones electromagnéticas se convierten a energía calorífica (Agarwal et al., 2021). La radiación de microondas es una forma de radiación electromagnética porque contiene componentes de campo eléctrico y magnético. El rango de frecuencias del microondas se encuentra entre 300 MHz y 300 GHz, con longitudes de onda que van desde 1mm a 1 m. Los hornos de microondas domésticos suelen operar a una frecuencia de 2.45 GHz. En el espectro electromagnético, las microondas se sitúan entre las frecuencias del infrarrojo y del radio, como se aprecia en la **Fig. 1**.

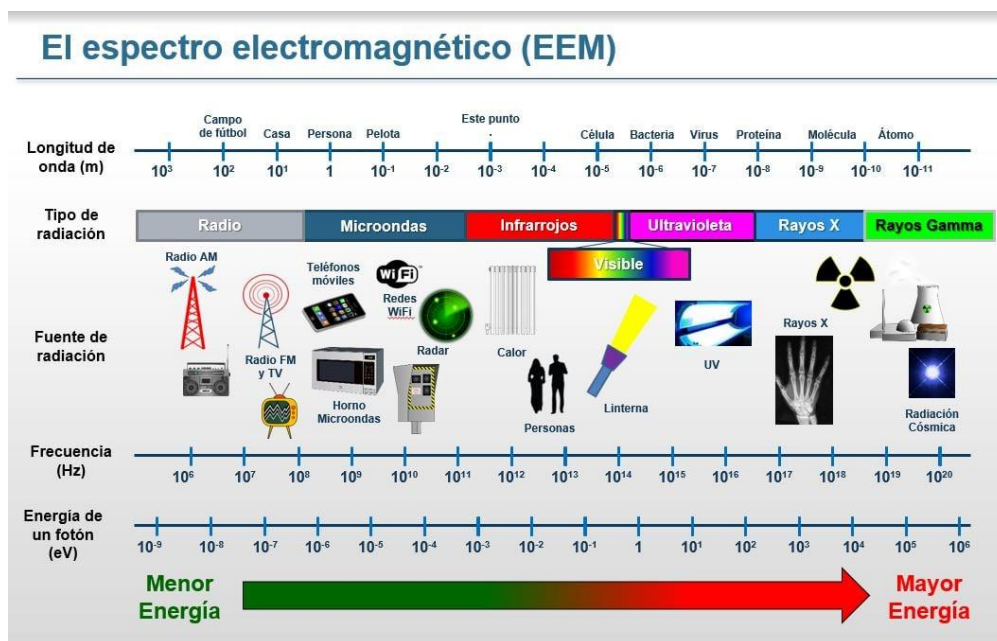
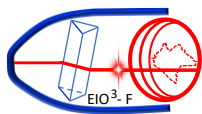


Figura 1. Ubicación del horno de microondas en el espectro electromagnético. Figura tomada de (Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud (CCARS), 2025).

La materia puede interactuar con las microondas de tres maneras distintas, de acuerdo a esto los materiales se pueden clasificar en transparentes, reflectantes y dieléctricos (**Fig. 2**). En el caso de los materiales transparentes como por ejemplo el cuarzo, las microondas penetran el material sin ninguna pérdida de energía, estos materiales se conocen como materiales transparentes a las microondas ya que permiten el paso de la radiación, su estructura molecular no absorbe ni refleja significativamente las microondas. Los materiales reflectantes como los metales no absorben la radiación de microondas, al contrario, las reflejan en la superficie. Por último los materiales dieléctricos, estos absorben las microondas, por ejemplo el agua y metanol (Lopez Camas & Ullah, 2022). Los materiales dieléctricos son aquellos que pueden polarizarse al aplicar un campo eléctrico. Estos materiales son capaces de absorber y convertir las microondas en calor (convierten energía electromagnética en energía térmica). En un horno de microondas, ondas electromagnéticas son generadas por un emisor (como el magnetrón) y se transmiten a través del espacio hacia el material en exposición lo cual genera un campo electromagnético alterno y esto a su vez provoca rotación molecular, colisión, torsión, y/o fricción dentro de la estructura molecular del material expuesto mediante interacciones rápidas entre las microondas y la muestra (Asomaning et al., 2018).



Los dos mecanismos por los cuales la radiación de microondas induce el calentamiento de las muestras o materiales expuestos son la polarización dipolar y la conducción iónica. Cuando una muestra es irradiada con microondas, los dipolos y los iones presentes en ella intentarán alinearse con el campo eléctrico alternante. En este proceso de continuo movimiento de reorientación y desplazamiento se genera fricción molecular y pérdidas dieléctricas provocando que la energía electromagnética se disipe en forma de calor dentro del material (Kappe & Dallinger, 2006).

La reorientación dipolar entre moléculas polares la fuerza del campo eléctrico cause que los electrones π y núcleo atómico sean desplazados de su posición de equilibrio, por lo tanto, induciendo dipolos. Las cargas positivas en el material se desplazan en la dirección del campo eléctrico, y las cargas negativas, en la dirección opuesta.

Para comprender el mecanismo mediante el cual las microondas inducen el calentamiento de una sustancia, es necesario entender los factores que determinan su interacción con el campo electromagnético, tales como sus propiedades dieléctricas, la polaridad molecular y la conductividad eléctrica del medio. Cada material posee un conjunto característico de propiedades dieléctricas, que influyen directamente en su capacidad de absorber y transformar la energía electromagnética en calor durante la exposición a microondas. Las principales propiedades dieléctricas son la constante dieléctrica (ϵ'), la pérdida dieléctrica (ϵ''), y la tangente de pérdidas ($\tan \delta$). El término constante dieléctrica se refiere a la capacidad de un material para polarizarse bajo la acción de un campo eléctrico externo y se expresa generalmente en relación con la permitividad al vacío. La propiedad dieléctrica más importante es la tangente de pérdidas ($\tan \delta$). Esta propiedad representa la capacidad de una sustancia para convertir la energía electromagnética en calor. Estas tres propiedades, juntas, están relacionadas con la capacidad de la muestra para absorber la energía de microondas. Estas tres propiedades son importantes al diseñar un experimento con microondas, por ejemplo, al elegir disolventes que favorezcan el calentamiento de la reacción. Los disolventes pueden clasificarse en tres grupos: de alta, media y baja absorción. Los de alta absorción son los que tienen valores de pérdidas dieléctricas por encima de 14, como, por ejemplo, etilenglicol, ácido fórmico, etanol, metanol, nitrobenzeno, 1-propanol e isopropanol. Estos disolventes pueden alcanzar temperaturas por encima de su ebullición de manera bastante eficaz y rápida. Los de media absorción tienen valores de pérdidas dieléctricas entre 1 y 13.99, entre ellos están el agua, isobutanol, acetona y ácido acético entre otros. Y finalmente los de baja absorción con valores de pérdidas dieléctricas menores a 1, estos disolventes pueden ser calentados con microondas, pero requieren de bastante tiempo para alcanzar temperaturas arriba de sus puntos de ebullición. Ejemplos de disolventes de baja absorción son tetrahidrofurano, tolueno, hexano (CEM, 2025).

Una característica de las reacciones asistidas por microondas es que los puntos de ebullición de los solventes dejan de ser un factor decisivo en la elección del parámetro de temperatura a utilizar. La energía de un microondas de 300 W va a sobrepasar el punto de ebullición de muchos solventes en cuestión de segundos, por esto los hornos para reacciones de laboratorio han sido diseñados con recipientes que pueden ser cerrados y presurizados (CEM, 2025). Por ejemplo, calentar etanol (punto de ebullición de 78 °C) en el microondas usando un recipiente cerrado a presión puede llegar a alcanzar una temperatura de 160 °C en 3 minutos, mientras que cuando se calienta en baño de aceite sin sistema de presurización a una temperatura ajustada de 100 °C, el solvente solo logra alcanzar aproximadamente 80 °C en 3 minutos y ahí se mantiene por el resto de la reacción (Kappe & Dallinger, 2006).

Generalmente, las reacciones se han llevado a cabo utilizando fuentes externas de calentamiento, tales como baños de aceite y de arena. En estos sistemas, el calor se transfiere por conducción, lo que implica un tiempo adicional prolongado previo a la reacción para alcanzar la temperatura deseada. Este método de transferencia de energía térmica depende de la conductividad térmica de los materiales, lo que limita la penetración uniforme del calor y provoca que la temperatura del recipiente sea mayor que la de la mezcla de reacción. En contraste, el calentamiento por microondas produce calentamiento interno eficiente, resultado de un acoplamiento directo de la energía de microondas con las moléculas polares que sean parte de la mezcla de reacción (Kappe & Dallinger, 2006).

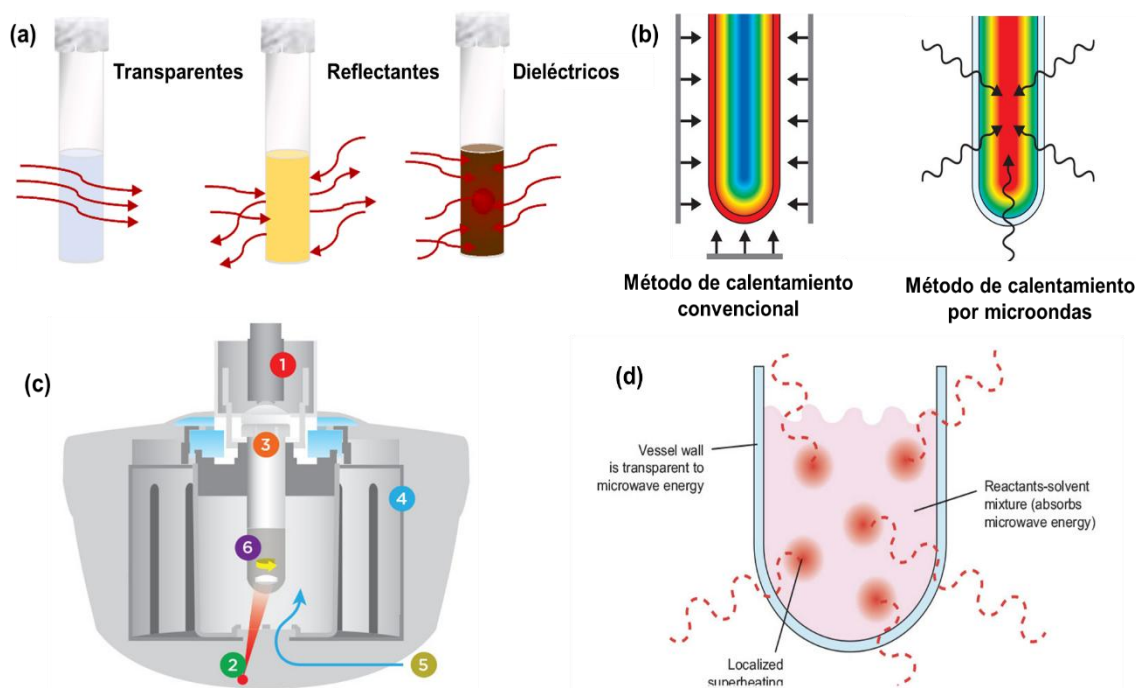
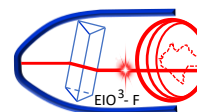
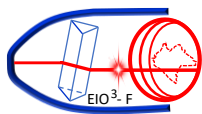


Figura 2. (a) Interacción de la radiación de microondas con diferentes tipos de materiales: los transparentes (no absorben la radiación), los reflectantes (metales que la reflejan) y los dieléctricos (que la absorben y se calientan internamente). (b) Comparación entre el calentamiento convencional por conducción, en el que el calor se transfiere desde la pared del recipiente hacia el interior, y el calentamiento por microondas, en el que la energía penetra directamente en el volumen de la muestra, generando calentamiento volumétrico. (c) Esquema simplificado de un reactor de microondas sellado, en el que la energía se dirige al vaso de reacción y la temperatura y la presión se controlan con precisión. (d) Representación del calentamiento selectivo, en el que la mezcla reactivo-disolvente absorbe la radiación de microondas, provocando sobrecalentamientos localizados mientras la pared del recipiente permanece transparente a la energía.

Por otro lado, el crecimiento poblacional y los cambios en los estilos de vida han impulsado la urbanización, la industrialización y un mayor consumo de energía y de materiales. Esta tendencia genera una creciente demanda de compuestos químicos y de recursos, lo que plantea el reto de desarrollar alternativas más sostenibles. Actualmente, un gran porcentaje de los compuestos químicos se obtienen a partir de fuentes fósiles. Sin embargo, este recurso es finito y su uso ha mostrado durante todos estos años muchos efectos negativos en el ambiente, contaminando el agua, el aire y liberando gases de invernadero en la atmósfera como CO_2 (Lopez Camas et al., 2025). Una de las fuentes renovables, biodegradables y amigables con el medio ambiente es la lignina. La lignina forma parte del material lignocelulósico, que está constituido por celulosa, hemicelulosa y lignina. Durante décadas, la celulosa se ha aprovechado comercialmente para producir bioetanol y papel, mientras que la lignina se ha considerado un subproducto residual con una estructura química alterada. A nivel global, se generan alrededor de 150 mil millones de toneladas de lignina al año, de las cuales la industria papelera de EE. UU. produce más de 50 millones de toneladas (Farag et al., 2014; Khan et al., 2022). Sin embargo, cerca del 95 % de la lignina industrial se quema para su recuperación energética o se desecha, y solo una pequeña fracción se destina a la síntesis de productos químicos como dispersantes, surfactantes, floculantes, adsorbentes y adhesivos. En el marco de una economía circular, las biorrefinerías buscan integrar la lignina en el aprovechamiento integral de la biomasa. Empresas como Borregaard y LignoTech ya desarrollan aplicaciones basadas en lignina, incluyendo aglutinantes, estabilizantes de emulsión y agentes complejantes, lo que refleja su creciente potencial industrial (Bajwa et al., 2019; Wang et al., 2023).



Químicamente, la lignina es un polímero fenólico formado por tres principales monómeros fenilpropanoides, conocidos como monolignoles, p-cumarílico, conferílico y sinapílico que a su vez iniciarán las unidades que formarán la lignina p-hidroxifenílico, guayacilo y siringilo, respetivamente.

La aplicación de la tecnología del microondas en la conversión de lignina se ha dividido en dos categorías (Yunpu et al., 2016):

1. **Pirólisis de lignina asistida por microondas.** Esta clasificación se refiere a la reacción de pirólisis que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno a altas temperaturas; estas reacciones pueden llevarse a cabo con o sin catalizador.
2. **Solvólisis de lignina asistida por microondas.** En esta clasificación se incluyen las reacciones de solvolisis; este tipo de reacciones requiere temperaturas de reacción relativamente bajas. Entre las ventajas de la solvolisis en microondas se encuentra un incremento de la eficiencia y la selectividad de la despolimerización.

La despolimerización de lignina es un proceso que tradicionalmente requiere altas temperaturas y largos tiempos de reacción, lo que lo convierte en una operación altamente intensiva en energía, de baja eficiencia y de limitada viabilidad económica. Este desafío se acentúa debido a la naturaleza compleja y altamente reticulada de la lignina, lo que dificulta la obtención de fracciones uniformes y reproducibles.

Ante ello, nuestro trabajo busca desarrollar una tecnología ambientalmente sostenible, escalable y de bajo consumo energético, capaz de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero frente a los métodos térmicos convencionales. Basándonos en estudios recientes que reportan un efecto sinérgico entre disolventes donadores de hidrógeno e irradiación por microondas, exploramos la viabilidad de la despolimerización de lignina Kraft asistida por microondas, empleando isopropanol y ácido fórmico como medios de reacción y sin necesidad de catalizadores metálicos. Esta aproximación aprovecha el calentamiento dieléctrico selectivo de las microondas, que permite una transferencia de energía más eficiente, una ruptura más controlada de enlaces β -O-4 y la obtención de lignina despolimerizada con menor masa molecular bajo condiciones leves de reacción

2. Métodos.

La metodología se basa en el trabajo reportado previamente (Lopez Camas et al., 2025). La reacción de despolimerización de lignina kraft se llevó a cabo en un reactor de microondas CEM-Discover (120 V, Matthews, EE. UU.), como se muestra en la **Fig. 3**. Un recipiente de reacción de microondas de capacidad de 10 mL, con una barra magnética de agitación, se llenó con la cantidad deseada de lignina kraft (0.5 g), 4 mL de isopropanol y 1.5 mL de ácido fórmico.

El recipiente se cerró y se colocó en el reactor de microondas, ajustando una presión máxima de 250 psi y una potencia máxima de 250 W. Mientras se mantenía la agitación continua, la mezcla de reacción se calentó hasta la temperatura deseada (100–200 °C) y se mantuvo durante el tiempo de reacción deseado. El inicio de cada reacción se consideró desde el momento en que alcanzó la temperatura deseada. En la **Fig. 3** se muestra el reactor de microondas usado para la reacción y los recipientes disponibles para este reactor, que son de capacidad de 10 mL y 80 mL, los cuales fueron utilizados cuando se requería mayor cantidad de lignina despolimerizada. Al completar la reacción, el producto obtenido presenta una fase líquida y otra sólida. Estas se separaron mediante filtración con papel de filtro pesado previamente.

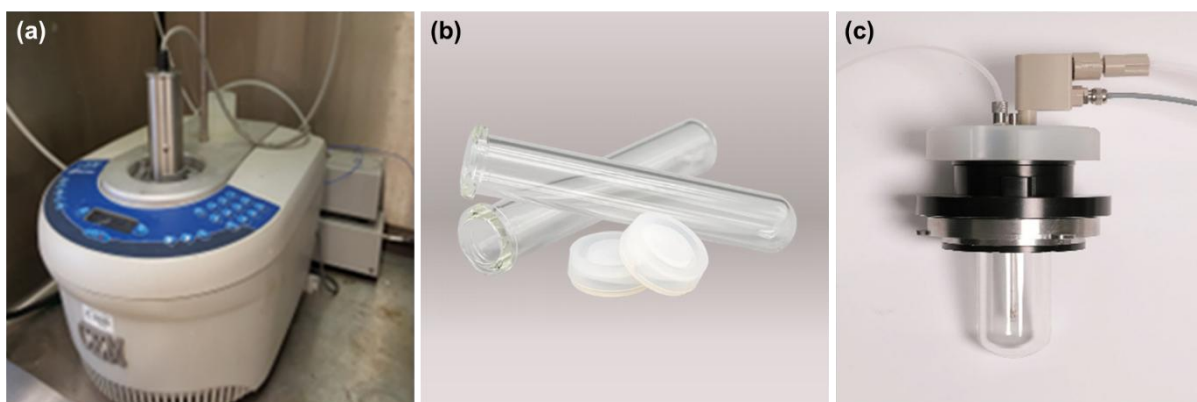
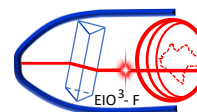


Figura 3. Reactor de microondas CEM-Discover (a), recipiente de reacción especial para microondas con capacidad de 10 mL (b), y recipiente de reacción en microondas con capacidad de 80 mL empleado para reacciones de mayor escala.

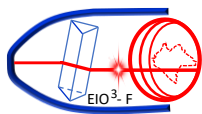
Las muestras se analizaron mediante cromatografía de permeación en gel (GPC) para determinar el promedio de masa molecular en número (M_n) y el promedio de masa molecular en peso (M_w). Para el análisis las muestras, primero se disolvieron en tetrahidrofurano y se filtraron a través de un filtro de jeringa de PTFE, los análisis se llevaron a cabo en un instrumento de cromatografía de permeación en gel equipado con una bomba y un muestreador automático (Agilent serie 1200), detector de dispersión de luz evaporativa (ELSD) y una columna Phenogel™ 5 μ m 500 Å. El tetrahidrofurano se usó como eluyente con un flujo de 0,5 mL/min, y la calibración se realizó con estándares de poliestireno.

3. Desarrollo.

El uso de microondas nos permitió despolimerizar la lignina en fragmentos más pequeños que los de la lignina inicial. Las reacciones de despolimerización requieren altas temperaturas y tiempos de reacción bastante largos, de aproximadamente 4 a 24 h, o incluso más, lo que hace que los procesos de despolimerización sean de alto consumo energético y, por lo general, no sean considerados viables económicamente. Esta investigación se basó en el uso de microondas como fuente de calentamiento para romper los enlaces químicos que mantienen la compleja unidad polimérica de la lignina y, con ello, reducir su masa molecular.

Previamente, en nuestro grupo se evaluó el consumo energético del calentamiento en microondas frente a los métodos convencionales. Los resultados demostraron que el uso de microondas es mucho más eficiente en términos de consumo de energía. En particular, la comparación con el método de baño de arena, que requirió **31.857 kWh mol⁻¹**, mientras que el proceso asistido por microondas requirió únicamente **1.417 kWh mol⁻¹**. Otra diferencia importante fue que para llevar a cabo la reacción manteniendo los mismos parámetros, el baño de arena requirió de **1819 min** mientras que en el microondas tomó solamente **54 min**, este tiempo incluye el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada y el tiempo de reacción a la temperatura específica de la reacción (Herrero & Ullah, 2021).

Se evaluaron distintos disolventes con el objetivo de seleccionar el que favoreciera rendimientos más altos y promoviera una despolimerización eficiente de la lignina hacia fracciones de menor masa molecular. Entre ellos, el ácido fórmico y el isopropanol mostraron valores de pérdida dieléctrica superiores a 14 (**Tabla 1**), lo que los clasifica como disolventes de alta absorción de microondas capaces de convertir la energía electromagnética en calor de manera eficiente. Para comparar el efecto del calentamiento convencional, se utilizó un baño de aceite en el mismo tipo de recipiente que se empleó en las reacciones por microondas. Sin embargo, este sistema no permitió mantener la presión interna generada durante el calentamiento, lo que provocó la liberación de vapor y la pérdida parcial del solvente, imposibilitando la reproducción de condiciones controladas. Posteriormente, se utilizó un matraz de fondo redondo de



dos bocas, equipado con un condensador y un termómetro, para minimizar la pérdida de solvente. La temperatura de reacción se limitó a 80 °C, en el cual se mantuvo estable el volumen de la mezcla. Las temperaturas más altas provocaron la evaporación parcial de los disolventes, alterando su proporción y, por tanto, las condiciones de reacción. Los análisis de GPC se realizaron a los **30 min** iniciales y luego cada hora, hasta alcanzar masas moleculares similares a las obtenidas con 30 min de tratamiento por microondas a la misma temperatura. Como se muestra en la **Fig. 4**. Fue necesario prolongar la reacción hasta **5 h** bajo calentamiento convencional, lo que confirma la mayor eficiencia del calentamiento por microondas. Usando microondas como método de calentamiento incluso observamos que con solo 15 min de reacción la masa molecular redujo significativa de la masa molecular inicial de la lignina Kraft (**Mn:2923.8 g/mol y Mw:10177 g/mol**) a el producto de lignina despolimerizada.

Tabla 1. Parámetros dieléctricos y puntos de ebullición de los disolventes seleccionados.

Disolvente	Punto de ebullición (°C)	Constante dieléctrica (ϵ')	Tan δ	Perdida dieléctrica (ϵ'')
Ácido fórmico	100	58.5	0.722	42.237
Isopropanol	82.3	18.3	0.799	14.622

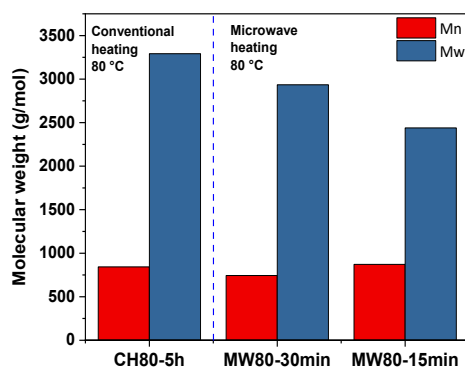


Figura 4. Masa molecular promedio numérica, Mn, y promedio en peso, Mw de la despolimerización de la lignina usando métodos convencionales de calentamiento (CH) y microondas (MW) a 80 °C.

Uno de los parámetros evaluados fue el efecto de la temperatura en el proceso de despolimerización, las temperaturas evaluadas fueron en el rango de 100 a 200 °C manteniendo constante un tiempo de reacción de 30 minutos, 0.5 g de lignina y 5.5 mL solvente en un recipiente especial de microondas con capacidad de 10 mL. La **Fig. 5** ilustra la relación entre la temperatura y la masa molecular de la lignina despolimerizada. Nuestros resultados indican que la temperatura desempeña un papel crucial en la ruptura de la estructura de la lignina. El rendimiento aumentó a medida que la temperatura pasó de 100 a 120 °C, alcanzando un valor máximo del 55,3 %. Sin embargo, al continuar aumentando la temperatura, el rendimiento disminuyó. A pesar de que a 140 °C se obtuvo un rendimiento ligeramente menor de lignina despolimerizada (bio-oil, 47,6 %), la masa molecular fue inferior a la obtenida a 120 °C.

Entre 120 °C y 200 °C, los residuos sólidos aumentaron del 46,41 % al 69,25 %. Este comportamiento puede atribuirse a que, al incrementar la temperatura, los fragmentos intermedios, como radicales fenólicos o fragmentos aromáticos parcialmente hidrogenados, tienden a ser altamente reactivos e inestables. En ausencia de suficiente hidrógeno disponible en el medio (ya sea por consumo del ácido fórmico o por limitación de transferencia), dichos radicales pueden recombinarse entre sí o con otros compuestos aromáticos, promoviendo la formación de enlaces -C-C y -C-O-C, lo cual resulta en nuevas estructuras condensadas que se vuelven los residuos sólidos al final de las reacciones (Toledano et al., 2013).

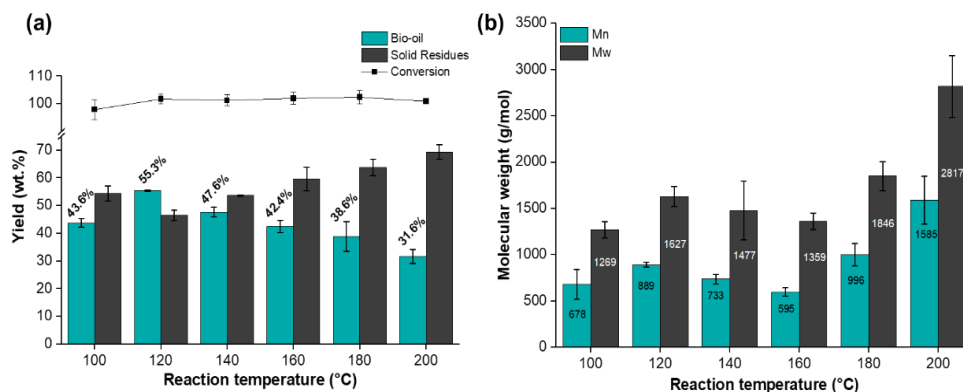
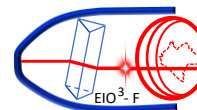


Figura 5. Efecto de la temperatura de reacción en el (a) rendimiento de la lignina despolimerizada y (b) en la masa molecular promedio numérica, Mn, y promedio en peso, Mw. Figura obtenida de (Lopez Camas et al., 2025)

Los resultados de la masa molecular a distintas temperaturas se muestran en la **Fig. 5b**. Temperaturas de 180 y 200 °C resultaron en un incremento de los valores de Mn y Mw, lo que indica, una vez más, que las temperaturas altas en el microondas no favorecieron la despolimerización de la lignina. Bajo radiación de microondas, el ácido fórmico no solo actúa como donante de hidrógeno, sino que también participa en una secuencia de formylation-elimination-hydrogenolysis que favorece la ruptura de los enlaces β -O-4 de la lignina. La energía dieléctrica acelera la transferencia de energía a los dipolos reactivos, mejorando la eficiencia del proceso frente al calentamiento convencional (Rahimi et al., 2014a; Zhou et al., 2022).

Conclusiones.

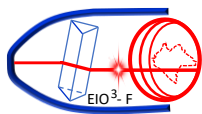
El uso de microondas en la despolimerización de lignina ofrece un método rápido, eficiente y sostenible para romper enlaces en condiciones más leves. Su capacidad de calentar selectivamente los componentes polares del sistema mejora la conversión a compuestos de menor peso molecular y reduce el consumo energético, lo que lo convierte en una alternativa prometedora frente a los métodos térmicos convencionales.

Créditos.

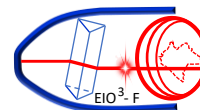
El autor agradece a la Universidad de Alberta (Canadá) por el apoyo académico y las facilidades brindadas para la realización de esta investigación, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT, México) por el financiamiento otorgado a través de su programa de becas de posgrado.

Referencias bibliográficas.

- Agarwal, A., Jo, Y. T., & Park, J. H. (2021). *Hybrid microwave-ultrasound assisted catalyst-free depolymerization of Kraft lignin to bio-oil*. *Industrial Crops and Products*, 162(January), 113300. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113300>
- Asomaning, J., Haupt, S., Chae, M., & Bressler, D. C. (2018). *Recent developments in microwave-assisted thermal conversion of biomass for fuels and chemicals*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(April 2017), 642–657. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.084>



- Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., & Bajwa, S. G. (2019).** *A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact.* *Industrial Crops and Products*, 139, 111526. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111526>
- CEM. (2025).** *Solvent Choice for Microwave Synthesis.* https://cem.com/microwave-chemistry/solvent-choice?__store=en&__from_store=cn
- Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud (CCARS). (2025).** *Qué radiaciones componen el espectro electromagnético, cuáles y cómo afectan a la salud y por qué no debemos tenerles miedo.* CCARS. <https://ccars.org.es/noticias-home/maldita-radiofrecuencia-noticias-lateral/280-que-radiaciones-componen-el-espectro-electromagnetico-cuales-y-como-afectan-a-la-salud-y-por-que-no-debemos-tenerles-miedo>
- Farag, S., Fu, D., Jessop, P. G., & Chaouki, J. (2014).** *Detailed compositional analysis and structural investigation of a bio-oil from microwave pyrolysis of kraft lignin.* *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 109, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.06.005>
- Herrero, Y. R., & Ullah, A. (2021).** *Rapid, Metal-Free, Catalytic Conversion of Glycerol to Allyl Monomers and Polymers.* *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(28), 9474–9485. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C03134>
- Kappe, C. O., & Dallinger, D. (2006).** *The impact of microwave synthesis on drug discovery.* *Nature Reviews Drug Discovery*, 5(1), 51–63. <https://doi.org/10.1038/nrd1926>
- Khan, R. J., Lau, C. Y., Guan, J., Lam, C. H., Zhao, J., Ji, Y., Wang, H., Xu, J., Lee, D. J., & Leu, S. Y. (2022).** *Recent advances of lignin valorization techniques toward sustainable aromatics and potential benchmarks to fossil refinery products.* *Bioresource Technology*, 346(August 2021), 126419. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126419>
- Lopez Camas, K., Ahvazi, B., & Ullah, A. (2025).** *Efficient and rapid depolymerization of Kraft lignin to bio-oil using microwave heating with solvent sequential extraction.* *Industrial Crops & Products*, 226, 120700. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120700>
- Lopez Camas, K., & Ullah, A. (2022).** *Depolymerization of lignin into high-value products.* *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 40, 102306. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102306>
- Riaz, A., Kim, C. S., Kim, Y., & Kim, J. (2016).** *High-yield and high-calorific bio-oil production from concentrated sulfuric acid hydrolysis lignin in supercritical ethanol.* *Fuel*, 172, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.051>
- Wang, T., Li, H., Diao, X., Lu, X., Ma, D., & Ji, N. (2023).** *Lignin to dispersants, adsorbents, flocculants and adhesives: A critical review on industrial applications of lignin.* *Industrial Crops and Products*, 199(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116715>
- Yunpu, W., Leilei, D., Liangliang, F., Shaoqi, S., Yuhuan, L., & Roger, R. (2016).** *Review of microwave-assisted lignin conversion for renewable fuels and chemicals.* In *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.03.011>



Biografías de los investigadores.



Karen López Camas es Doctora en Ciencias egresada de la Universidad de Alberta (Canadá), en el Departamento de Ciencias Agrícolas, Alimentarias y Nutricionales (Agricultural, Food and Nutritional Science), con especialización en Bioresource Technology. Actualmente se encuentra realizando un postdoctorado en el grupo de investigación del Dr. Aman Ullah en la Universidad de Alberta, continuando con proyectos de investigación sobre el aprovechamiento de la lignina para la fabricación de productos de valor agregado.



Aman Ullah Holds a Ph.D. in Chemical Sciences and Technologies from the University of Genova (Italy), where he also conducted part of his doctoral research at Southern Methodist University (United States). He is a Full Professor in the Department of Agricultural, Food and Nutritional Science at the University of Alberta (Canada). He is also the Associate Dean (Academic) in the Faculty of Agricultural, Life and Environmental Sciences. He leads the Lipid/Materials Chemistry Research Group (LMCG), specializing in the chemical conversions of biomass and synthesis of biopolymers, biochemicals, biocomposites, and bionanocomposites from lipids and other renewable resources for various industrial applications. He has received distinctions such as the Canadian Rising Star Award, the ALES Research and Innovation Award, and the ASTech Award (2022).