

Phenolic Compound Production by Kraft Lignin Pyrolysis: Effect of Temperature and Pumice as a Natural Catalyst

Abstract– The valorization of lignin derived from the pulp and paper industry has attracted significant interest due to its high aromatic content and its potential as a renewable feedstock for value-added chemicals. In this study, the production of phenolic compounds from Kraft lignin through pyrolysis at different temperatures was investigated. Experiments were conducted in a reactor Parr Series 4740 at 450, 500, and 550 °C, both in the absence and presence of pumice as a natural catalyst. The vapors generated during the process were condensed to obtain bio-oil, while biochar was recovered as the solid residual fraction. The resulting bio-oil was subjected to liquid–liquid extraction to isolate the aromatic fraction enriched in phenolic compounds. The results showed that both temperature and catalyst presence significantly influenced product distribution. In particular, the addition of pumice increased the bio-oil yield from 6.88 % to 24.28 % at 550 °C, indicating a strong catalytic effect on the conversion of lignin-derived intermediates into condensable aromatic compounds. GC–MS analysis revealed the presence of phenols, methylphenols, and methoxyphenols, which are consistent with the thermal depolymerization of guaiacyl units in Kraft lignin. These findings demonstrate the potential of catalytic pyrolysis of Kraft lignin using pumice as a natural catalyst for the production of phenolic compounds.

Keywords– Kraft lignin, pyrolysis, pumice, bio-oil, phenolic compounds.

Producción de compuestos fenólicos mediante pirólisis de lignina Kraft: efecto de la temperatura y de la pumicita como catalizador natural

Resumen— La valorización de lignina derivada de la industria de pulpa y papel ha adquirido creciente interés debido a su alto contenido aromático y a su potencial como materia prima renovable para la obtención de productos químicos de mayor valor agregado. En este estudio se evaluó la producción de compuestos fenólicos a partir de lignina Kraft mediante pirólisis a diferentes temperaturas. Los experimentos se realizaron en un reactor Parr Series 4740 a 450, 500 y 550 °C, tanto en ausencia como en presencia de pumicita como catalizador natural. Los vapores generados durante el proceso se condensaron para obtener bio-oil, mientras que el biochar se recuperó como fracción sólida residual. Posteriormente, el bio-oil obtenido fue sometido a extracción líquido-líquido con el fin de aislar la fracción aromática enriquecida en compuestos fenólicos. Los resultados mostraron que tanto la temperatura de operación como la presencia del catalizador influyeron significativamente en la distribución de productos. En particular, la adición de pumicita incrementó el rendimiento de bio-oil desde 6,88 % hasta 24,28 % a 550 °C, lo que evidencia un efecto catalítico importante en la conversión de intermediarios derivados de la lignina hacia compuestos aromáticos condensables. El análisis mediante GC-MS reveló la presencia predominante de fenoles, fenoles metilados y metoxifenoles, compuestos consistentes con la despolimerización térmica de unidades guayacílicas presentes en la lignina Kraft. Estos resultados demuestran el potencial de la pirólisis catalítica de lignina Kraft utilizando pumicita como catalizador natural para la producción de compuestos fenólicos de interés químico.

Palabras clave— lignina Kraft, pirólisis, pumicita, bio-oil, compuestos fenólicos.

I. INTRODUCCIÓN

La lignina es uno de los biopolímeros aromáticos más abundantes en la biomasa lignocelulósica y representa una materia prima con alto potencial para la obtención de compuestos químicos de valor. Sin embargo, una fracción importante de la lignina generada en procesos industriales, como la lignina Kraft, todavía se destina principalmente a combustión.

A nivel mundial se estima que la industria de pulpa y papel genera más de 50 millones de toneladas de lignina anualmente, de las cuales solo una pequeña fracción es utilizada para aplicaciones químicas de mayor valor agregado, mientras que la mayor parte se emplea como combustible dentro de las propias plantas industriales. Esta situación ha impulsado el desarrollo de estrategias de valorización de lignina dentro del concepto de biorrefinería, donde este biopolímero puede

transformarse en compuestos aromáticos renovables con aplicaciones en la industria química y de materiales [1].

En este contexto, la pirólisis surge como una ruta termoquímica atractiva para transformar este residuo en fracciones líquidas, sólidas y gaseosas con potencial de aprovechamiento.

Durante la pirólisis de lignina se produce la ruptura térmica de enlaces éter y carbono-carbono presentes en la estructura del polímero, generándose una mezcla compleja de productos que incluye biochar, gases no condensables y una fracción líquida conocida como bio-oil. Esta fracción líquida contiene una elevada proporción de compuestos aromáticos oxigenados tales como fenoles, guayacoles, siringilos, aldehídos aromáticos y cetonas, los cuales pueden ser utilizados como precursores de resinas fenólicas, solventes y otros productos químicos de interés industrial [2].

El interés de esta investigación se centra en potenciar la selectividad hacia compuestos fenólicos del bio-oil, debido a su relevancia como precursores para resinas, solventes, antioxidantes y otras aplicaciones químicas.

En los últimos años, la pirólisis catalítica ha sido ampliamente estudiada como una estrategia para mejorar la selectividad hacia compuestos aromáticos específicos y modificar la distribución de productos generados durante la conversión termoquímica de biomasa. Catalizadores sólidos ácidos, como zeolitas, óxidos metálicos y materiales silicoaluminosos, pueden favorecer reacciones de craqueo, desoxigenación y reorganización aromática durante el proceso.

El uso de catalizadores minerales naturales constituye una alternativa técnicamente interesante y económicamente accesible frente a catalizadores sintéticos de mayor costo. En particular, la pumicita destaca por su disponibilidad, estructura porosa y composición mineral, características que podrían influir en mecanismos de desoxigenación, craqueo y reordenamiento aromático durante la pirólisis [3-7].

La pumicita es una roca volcánica de naturaleza silicoaluminosa caracterizada por una elevada porosidad y una superficie rica en grupos funcionales que pueden actuar como sitios ácidos [8-9]. Estas propiedades podrían favorecer interacciones entre los vapores generados durante la pirólisis y la superficie del material, promoviendo reacciones de transformación química que influyen en la composición del bio-oil obtenido [10].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materia prima y diseño experimental

La materia prima utilizada correspondió a lignina Kraft, mientras que la pumicita fue empleada como catalizador previamente acondicionado. El diseño experimental consideró ensayos de pirólisis a 450, 500 y 550 °C, con un tiempo de residencia de 3 h, tanto en ausencia como en presencia del catalizador.

Los productos generados se separaron en tres fracciones: condensable (bio-oil), sólida (biochar) y no condensable. Esta última se estimó por diferencia a partir del balance de masa.

Para evaluar la distribución de productos, se determinaron los rendimientos máxicos de cada fracción considerando la masa inicial de lignina alimentada al reactor y las masas recuperadas en las fracciones líquida y sólida.

B. Estrategia de caracterización

La evaluación experimental contempló: i) la determinación de rendimientos máxicos de cada fracción; ii) la caracterización del catalizador antes y después de la reacción; iii) el análisis FTIR para identificar grupos funcionales presentes en lignina, biochar y bio-oil; y iv) el análisis GC-MS para reconocer compuestos fenólicos y otros aromáticos oxigenados presentes en la fase líquida.

La interpretación de los resultados se enfocó en analizar la relación entre las condiciones de operación del proceso y la distribución de productos obtenidos, así como en identificar los principales compuestos aromáticos presentes en la fracción líquida generada durante la pirólisis.

C. Aislamiento y preparación de la lignina Kraft

La lignina Kraft utilizada como materia prima fue aislada desde licor negro generado en un proceso industrial de pulpeo, mediante precipitación ácida a pH 2 con ácido sulfúrico, seguida de filtración, lavado y acondicionamiento previo a los ensayos, siguiendo un procedimiento adaptado de Aldabalde [11]. En la etapa de preparación, las muestras fueron congeladas a temperaturas inferiores a -40 °C y posteriormente liofilizadas, con el fin de preservar su estructura química y sus propiedades físicas antes de su uso experimental. El material seco obtenido fue almacenado en un desecador para evitar la absorción de humedad antes de su utilización en los experimentos de pirólisis. Su caracterización incluyó espectroscopía FTIR empleando un equipo JASCO FT/IR-4600.

D. Activación y caracterización de la pumicita

Como catalizador natural se utilizó pumicita proveniente del complejo volcánico Cordón Caulle. Este material volcánico fue

seleccionado debido a su disponibilidad regional, su elevada porosidad y su potencial presencia de sitios ácidos superficiales, los cuales podrían favorecer reacciones catalíticas durante la pirólisis de lignina.

La pumicita fue activada mediante tratamiento ácido y térmico para mejorar su desempeño catalítico. La activación se realizó con una solución de H₂SO₄ en proporción 1:10, manteniendo la muestra bajo agitación a 25 ± 1 °C durante 72 h, seguida de un tratamiento térmico en mufla VULCAN 3-550 a 500 °C durante 5 h, de acuerdo con metodologías reportadas previamente [8], [10]. La caracterización del catalizador activado incluyó espectroscopía FTIR en el rango de 4000 a 400 cm⁻¹, evaluación de bandas funcionales características y determinación de sitios ácidos de Lewis y Brønsted mediante adsorción de piridina y espectroscopía UV-Vis/FTIR, siguiendo el enfoque descrito por Velthoen et al. [12].

E. Ensayos de pirólisis y fraccionamiento del bio-oil

Los ensayos de pirólisis se realizaron en un reactor Parr Series 4740, operado en un ambiente libre de oxígeno mediante un flujo constante de nitrógeno de 60 mL/min. Se evaluó el efecto de la temperatura a 450, 500 y 550 °C, tanto en ausencia como en presencia de pumicita, con el propósito de analizar la influencia de estas variables sobre el rendimiento y la composición del bio-oil. Los vapores generados durante el proceso fueron condensados para obtener la fracción líquida, mientras que el residuo sólido fue recuperado como biochar. Posteriormente, el bio-oil fue sometido a extracción líquido-líquido con cloroformo en una proporción 1:10 (v/v). La mezcla se agitó y luego se centrifugó para favorecer la separación de fases, aislándose así la fracción aromática enriquecida en compuestos fenólicos para su posterior análisis, siguiendo un procedimiento adaptado de Borella et al. [13].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización estructural de la lignina Kraft

El espectro FTIR de la lignina Kraft (Fig. 1) mostró una banda ancha en la región de 3200–3600 cm⁻¹, atribuida al estiramiento de grupos O–H. La señal observada alrededor de 2930 cm⁻¹ se asoció al estiramiento C–H alifático. Asimismo, se identificaron bandas intensas en la región de 1600–1510 cm⁻¹, características de vibraciones esqueléticas del anillo aromático. Estas señales confirmaron la naturaleza aromática de la lignina y su potencial para generar compuestos fenólicos durante su despolimerización térmica. En la zona de 1260–1030 cm⁻¹ se observaron señales relacionadas con grupos guayacólicos y enlaces C–O, consistentes con la estructura química esperada para lignina Kraft. La presencia de estas unidades estructurales resulta coherente con la formación posterior de compuestos metoxifenólicos en el bio-oil, tal como ha sido descrito para la pirólisis de lignina y, particularmente, de lignina Kraft [2], [5], [7].

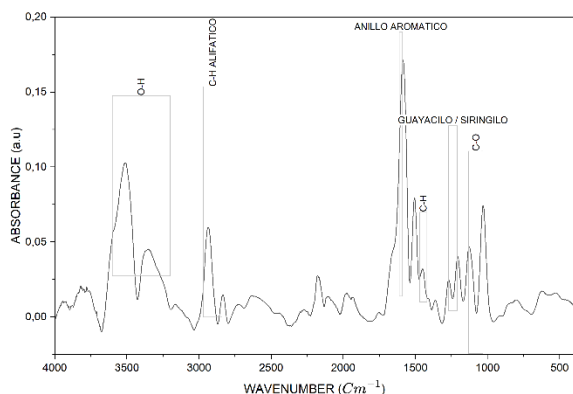


Fig. 1 Espectro FTIR de lignina Kraft.

B. Caracterización físico-química de la pumicita

La pumicita activada (Fig. 2) presentó una banda ancha en la región de $3600\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$, atribuida al estiramiento de grupos O-H asociados a agua adsorbida y grupos hidroxilo superficiales. Además, se observaron señales en la región de $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ y alrededor de 800 cm^{-1} , vinculadas a vibraciones de enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, características de materiales silicoaluminosos. Estas señales confirmaron la naturaleza mineral de la pumicita y respaldaron su potencial uso como catalizador natural en el proceso de pirólisis, en concordancia con lo reportado para materiales pumíceos con carácter ácido superficial [8], [10].

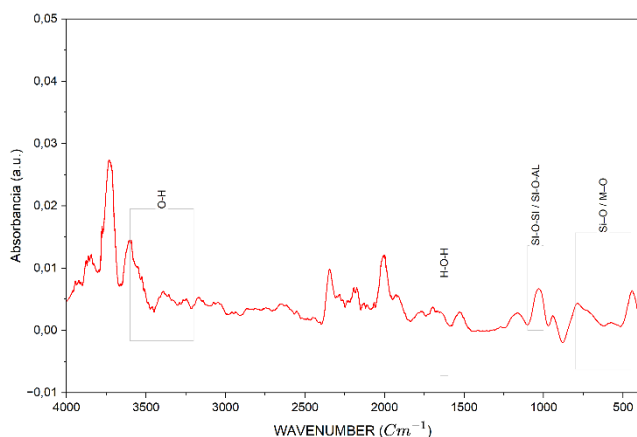


Fig. 2 Espectro FTIR de la pumicita activada.

La caracterización UV-Vis de la solución de piridina antes y después del contacto con pumicita (Fig. 3) evidenció cambios en la región ultravioleta, especialmente alrededor de 260 y 275 nm, longitudes de onda asociadas a interacciones con sitios ácidos de Lewis y Brønsted. La disminución de la señal después del contacto con el sólido sugirió la adsorción de piridina sobre la superficie del material, lo que constituyó una evidencia

complementaria de la presencia de sitios activos, de acuerdo con el uso de piridina como molécula sonda para la identificación de sitios ácidos en catalizadores sólidos [12].

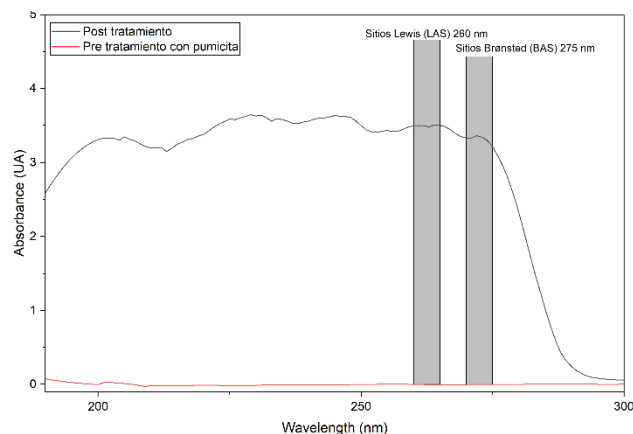


Fig. 3 Espectro UV-Vis de la solución de piridina antes y después del contacto con pumicita.

La comparación entre los espectros FTIR de la pumicita natural y la pumicita después de la adsorción de piridina (Fig. 4) mostró variaciones en la intensidad de bandas asociadas a grupos superficiales y enlaces característicos de la matriz mineral. En particular, la muestra tratada con piridina presentó un incremento de señal en distintas regiones del espectro, lo que sugirió la interacción de esta molécula con sitios activos presentes en la superficie del material. Los resultados obtenidos por FTIR y UV-Vis indicaron que la pumicita activada presentó características compatibles con un material capaz de interactuar con los vapores generados durante la pirólisis.

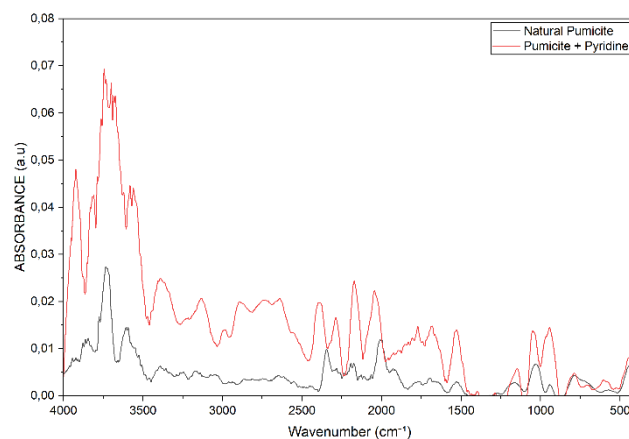


Fig. 4 Espectros FTIR de pumicita natural y pumicita después de la adsorción de piridina.

C. Efecto de la temperatura y del catalizador en la distribución de productos de la pirólisis.

La pirólisis de lignina Kraft mostró que la distribución de productos estuvo influenciada tanto por la temperatura de operación como por la presencia de pumicita. En todas las condiciones evaluadas, el biochar correspondió a la fracción predominante, lo que es consistente con la alta tendencia de la lignina a formar estructuras aromáticas condensadas durante su descomposición térmica y, en consecuencia, residuos sólidos ricos en carbono [1], [2]. Como se muestra en la Fig. 5, la adición de pumicita incrementó el rendimiento de bio-oil en todas las temperaturas evaluadas. A 450 °C, el rendimiento aumentó desde 7,53 % hasta 11,28 %; a 500 °C, desde 6,34 % hasta 16,65 %; y a 550 °C se observó el efecto más marcado, con un incremento desde 6,88 % hasta 24,28 % en presencia de catalizador. En paralelo, el rendimiento de biochar disminuyó desde 62,94 % hasta 58,63 % a 450 °C y desde 63,87 % hasta 52,87 % a 500 °C, mientras que a 550 °C aumentó levemente desde 53,74 % hasta 57,51 %. Por su parte, el biogás presentó variaciones menores a 450 y 500 °C, pero disminuyó de 39,38 % a 18,21 % a 550 °C en presencia de pumicita. Este comportamiento podría atribuirse a la interacción entre los vapores generados durante la descomposición térmica de la lignina y los sitios ácidos presentes en la superficie del catalizador, los cuales pueden promover reacciones de craqueo, despolimerización y transformación de compuestos oxigenados, modificando así la distribución global de productos [4], [6]. Los resultados obtenidos sugieren que la pumicita favoreció la formación de la fracción líquida, especialmente a mayor temperatura de operación, en concordancia con lo reportado para procesos de pirólisis catalítica de lignina Kraft [5].

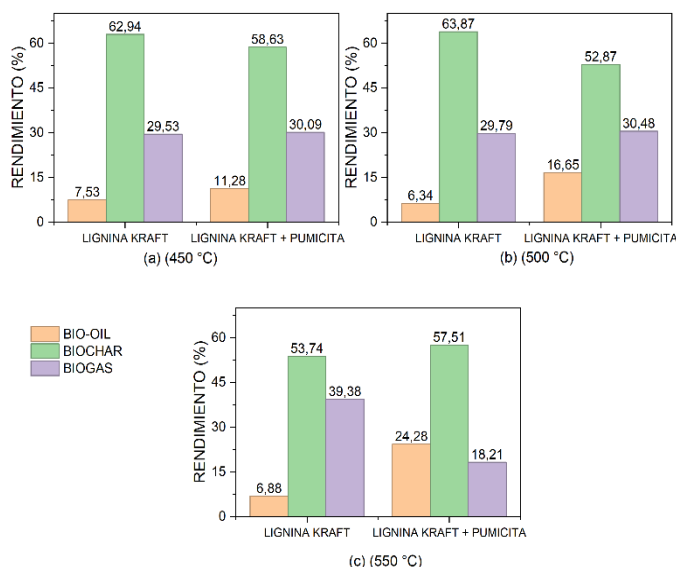


Fig. 5 Distribución de bio-oil, biochar y biogás obtenida durante la pirólisis de lignina Kraft en ausencia y presencia de pumicita a diferentes temperaturas: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C. Condiciones de operación: 3 h, 0,5 bar de N₂ y ≈ 15 g de biomasa.

Como se muestra en la Fig. 6, la presencia de pumicita aumentó significativamente el rendimiento de bioaceite a todas las temperaturas evaluadas, observándose el efecto más pronunciado a 550 °C.

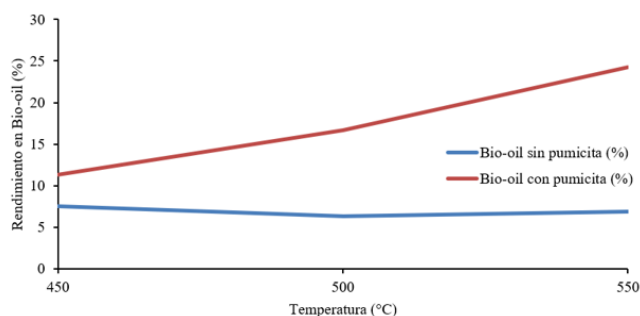


Fig. 6 Rendimiento de bioaceite obtenido durante la pirólisis de lignina Kraft a diferentes temperaturas con y sin catalizador.

D. Composición química del bio-oil

El cromatograma GC-MS del bio-oil obtenido a 550 °C en presencia de pumicita mostró una distribución compleja de compuestos, dominada por aromáticos oxigenados derivados de la despolimerización de la lignina (Fig. 7). Entre los principales compuestos identificados se encontraron fenoles, fenoles metilados y una serie de derivados metoxifenólicos, incluyendo 2-metoxi-6-metilfenol, 2-metoxi-4-vinilfenol y 4-etil-2-metoxifenol. Asimismo, se detectaron aldehídos y cetonas aromáticas oxigenadas, como 4-hidroxi-2-metoxibenzaldehído y 1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)-etanona. Los resultados indicaron que la fracción líquida obtenida contuvo compuestos de interés químico asociados a la conversión termoquímica de la lignina hacia productos fenólicos, en concordancia con lo reportado para la pirólisis de lignina Kraft [2], [5], [7].

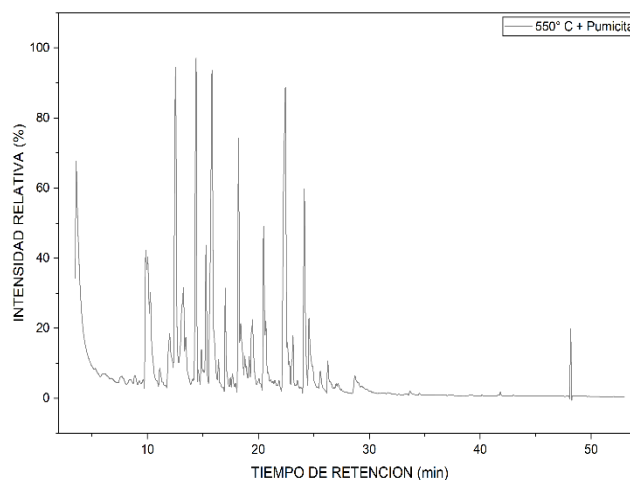


Fig. 7 Cromatograma GC-MS representativo del bio-oil

En la Tabla 1 se presentan algunos de los compuestos principales identificados en el bio-oil obtenido a 550 °C en presencia de pumicita. Se observó un predominio de fenoles, metoxifenoles y compuestos aromáticos oxigenados, lo que resultó consistente con la despolimerización térmica de la lignina. En particular, la presencia de compuestos como 2-metoxi-6-metilfenol, 2-metoxi-4-vinilfenol y 4-etil-2-metoxifenol indicó que durante la pirólisis ocurrieron transformaciones secundarias que conservaron sustituyentes oxigenados sobre el anillo aromático. Asimismo, se encontraron aldehídos aromáticos oxigenados, tales como 4-hidroxi-2-metoxibenzaldehído y 1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)-ethanone, compuestos asociados a la conversión termoquímica de la lignina hacia productos fenólicos de interés químico.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que el efecto combinado de la temperatura y de la pumicita no solo modificó la distribución global de productos, sino también las rutas de conversión de la lignina Kraft durante la pirólisis. El incremento del rendimiento de bio-oil observado en presencia de pumicita, especialmente a 550 °C, evidenció que este material mineral favoreció la ruptura de enlaces en la macromolécula de lignina y promovió la formación de compuestos condensables de menor peso molecular. Este comportamiento podría estar asociado a la presencia de sitios ácidos superficiales evidenciados por adsorción de piridina, los cuales pueden intervenir en reacciones de craqueo, despolimerización y transformación de intermediarios oxigenados [4], [12].

Desde el punto de vista estructural, la lignina Kraft posee una red aromática compleja compuesta por unidades fenólicas sustituidas, principalmente de unidades guayacilicas (G), cuya descomposición térmica conduce a una mezcla de fenoles, metoxifenoles, aldehídos y cetonas aromáticas [2], [5]. En este contexto, la temperatura de operación cumple un rol decisivo, ya que al aumentar desde 450 hasta 550 °C se incrementa la severidad térmica del proceso, facilitando la escisión de enlaces éter y carbono-carbono presentes en la lignina. Como consecuencia, se favorece la liberación de fragmentos aromáticos y la formación de moléculas fenólicas de interés químico. La mayor producción de bio-oil a 550 °C en presencia de pumicita sugirió que, bajo estas condiciones, existió una interacción más efectiva entre la fase volátil generada y los sitios activos del catalizador, en concordancia con lo descrito para procesos de pirólisis catalítica de lignina [4], [5], [6].

Por otra parte, el hecho de que el biochar siguiera siendo la fracción predominante en todas las condiciones evaluadas indicó que una parte importante de la lignina evolucionó hacia estructuras carbonosas condensadas durante la pirólisis. Esto resultó coherente con la alta tendencia de la lignina a formar residuos sólidos aromáticos debido a reacciones secundarias de repolimerización y condensación [1], [2]. No obstante, la presencia de pumicita pareció desplazar parcialmente este equilibrio hacia la formación de productos líquidos, lo que

resultó favorable desde la perspectiva de valorización química del proceso.

La distribución de las principales familias de compuestos identificadas mediante GC-MS en el bio-oil obtenido a 550 °C en presencia de pumicita se muestra en la Fig. 8. Se observó que los metoxifenoles y los fenoles metilados constituyeron las familias predominantes, mientras que también se identificaron aldehídos aromáticos oxigenados en menor proporción. Esta distribución fue consistente con la despolimerización de unidades guayacilicas presentes en la lignina Kraft, las cuales generan principalmente derivados fenólicos durante su degradación térmica [2], [5], [7].

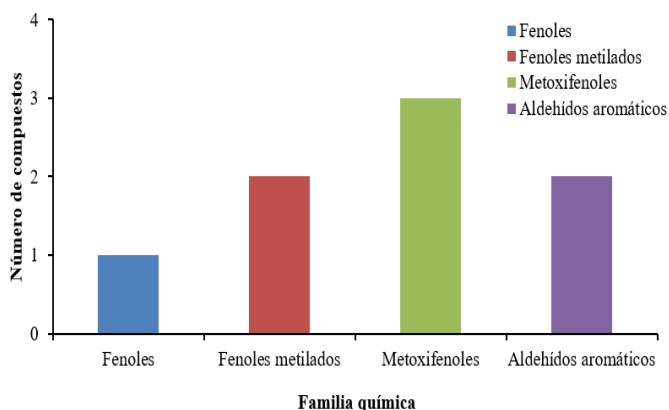


Fig. 8 Distribución de las familias de compuestos identificados en el bio-oil obtenido mediante pirólisis catalítica de lignina Kraft a 550 °C en presencia de pumicita.

Se puede observar que la pirólisis de lignina Kraft en presencia de pumicita representó una estrategia atractiva para orientar la valorización de este subproducto industrial hacia fracciones líquidas enriquecidas en compuestos fenólicos. Sin embargo, para profundizar en el potencial del sistema, sería conveniente complementar el estudio con un análisis comparativo detallado de la composición del bio-oil en todas las condiciones evaluadas, así como con una cuantificación relativa de familias químicas en función de la temperatura y del uso de catalizador. Ello permitiría determinar con mayor precisión si la pumicita no solo aumenta el rendimiento de bio-oil, sino también la selectividad hacia compuestos fenólicos específicos de mayor valor agregado.

TABLA 1

COMPUESTOS PRINCIPALES IDENTIFICADOS EN EL BIO-OIL
OBTENIDO A 550 °C CON PUMICITA

Tiempo de retención (min)	Compuesto identificado
9,853	Fenol
12,002	2-metilfenol
14,875	2,6-dimetilfenol
15,298	2-metoxi-6-metilfenol
18,233	4-etil-2-metoxifenol
19,383	2-metoxi-4-vinilfenol
22,467	4-hidroxi-2-metoxibenzaldehído
24,168	3,4-dimetoxibenzaldehído

IV. CONCLUSIONES

La pirólisis de lignina Kraft evidenció una fuerte dependencia de la temperatura y del uso de pumicita en la distribución de productos. La incorporación del catalizador incrementó significativamente el rendimiento de bio-oil, especialmente a 550 °C, lo que sugiere un efecto activo en la conversión de intermediarios hacia compuestos condensables. El bio-oil obtenido estuvo compuesto principalmente por fenoles, metoxifenoles y compuestos aromáticos oxigenados, confirmando la despolimerización térmica de unidades guayacílicas. En conjunto, los resultados demuestran que la pumicita es una alternativa natural viable para mejorar la valorización termoquímica de lignina Kraft, favoreciendo la producción de compuestos fenólicos de interés.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CMPC, Planta Santa Fe, Chile por el suministro de licor negro y por el apoyo proporcionado para el desarrollo de este estudio, además al proyecto *FONDECYT REGULAR N°1231041 "Demethylation and catalytic depolymerization of oxi organosolv lignin in acidic ionic liquids: sustainable sourcing of phenolic compounds of industrial interest"*

VI. REFERENCIAS

- [1] F. X. Collard and J. Blin, "A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 594–608, 2014.
- [2] H. Kawamoto, "Lignin pyrolysis reactions," *J. Wood Sci.*, vol. 63, no. 2, pp. 117–132, 2017.
- [3] X. Lu and X. Gu, "A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency," *Biotechnol. Biofuels Bioprod.*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [4] R. Liu, M. Sarker, M. M. Rahman, C. Li, M. Chai, Nishu, R. Cotillon, and N. R. Scott, "Multi-scale complexities of solid acid catalysts in the catalytic fast pyrolysis of biomass for bio-oil production: A review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 80, 2020.
- [5] G. Iakovou, D. Ipsakis, and K. S. Triantafyllidis, "Kraft lignin fast (catalytic) pyrolysis for the production of high value-added chemicals (HVACs): A techno-economic screening of valorization pathways," *Environ. Res.*, vol. 248, 2024.
- [6] F. Muhammad, J. Nisar, G. Ali, F. Anwar, S. T. Hussain, and S. W. Khan, "Improved bio-oil yield from thermo-catalytic pyrolysis of Citrus limetta waste over pumice: Determination of kinetic parameters using Kissinger method," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 24, 2023.
- [7] A. T. Tumbalam Gooty, D. Li, F. Berruti, and C. Briens, "Kraft-lignin pyrolysis and fractional condensation of its bio-oil vapors," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 106, pp. 33–40, 2014.
- [8] B. Ersoy, A. Sariisik, S. Dikmen, and G. Sariisik, "Characterization of acidic pumice and determination of its electrokinetic properties in water," *Powder Technol.*, vol. 197, no. 1–2, pp. 129–135, 2010.
- [9] L. Cavaleri, N. Miraglia, and M. Papia, "Pumice concrete for structural wall panels," *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 115–125, 2003.
- [10] L. F. Mamani-De La Cruz, R. Churata, A. G. Valencia-Huaman, S. H. Fuentes-Mamani, and J. Almirón, "Comparison of the Synthesis Method of Zeolite Catalysts Based on Pozzolan, Pumice, and Ignimbrite Applied to the Sustainable Pyrolysis of Polymers," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 2986, 2025.
- [11] V. Aldabalde, *Recuperación de productos químicos de alto valor agregado a partir de lignina Kraft*, Tesis doctoral, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2015.
- [12] M. E. Z. Velthoen, S. Nab, and B. M. Weckhuysen, "Probing Acid Sites in Solid Catalysts with Pyridine UV-Vis Spectroscopy," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2018, DOI: 10.1039/C8CP03991G.
- [13] M. Borella, A. A. Casazza, G. Garbarino, P. Riani, and G. Busca, "Upgrading of kraft lignin pyrolysis products: Managing sulfur impurities," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 28, p. 101988, 2024.