

## Revalorización de lignina, Fase II: Síntesis de compuestos y aplicaciones en Ingeniería Ambiental

### Lignin revalorization, Phase II: Compound Synthesis and Applications on Environmental Engineering.

Rico Velázquez, Paulina Jocelyn.<sup>1</sup> Huerta Delgado, Jaime Juan.<sup>2</sup> Meza Cano, Cesar Emilio.<sup>3</sup> García Cerrito, Laura Erendira.<sup>4</sup> Ramirez, Lopez Jose Sebastian de Jesus.<sup>5</sup> Aguilar de la Fuente, Andrea.<sup>6</sup> Villalobos Pérez, Saúl.<sup>7</sup> Cano Muñoz Pedro Arturo<sup>8</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8</sup> Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato  
[pi.ricovelazquez@ugto.mx](mailto:pi.ricovelazquez@ugto.mx)<sup>1</sup>; [jj.huerta.delgado@ugto.mx](mailto:jj.huerta.delgado@ugto.mx)<sup>2</sup>; [ce.mezacano@ugto.mx](mailto:ce.mezacano@ugto.mx)<sup>3</sup>; [le.garciacerrito@ugto.mx](mailto:le.garciacerrito@ugto.mx)<sup>4</sup>; [jsdj.ramirezlopez@ugto.mx](mailto:jsdj.ramirezlopez@ugto.mx)<sup>5</sup>; [a.aguilardelafuente@ugto.mx](mailto:a.aguilardelafuente@ugto.mx)<sup>6</sup>; [s.villalobos@ugto.mx](mailto:s.villalobos@ugto.mx)<sup>7</sup>; [pa.cano@ugto.mx](mailto:pa.cano@ugto.mx)<sup>8</sup>

## Resumen

La lignina es uno de los tres biopolímeros más abundantes en el planeta, representando aproximadamente el 30% de la biomasa. En este trabajo se presenta una ruta optimizada para extraer la lignina a partir de residuos agrícolas de paja de maíz de la región del bajo. La lignina tiene una potencial aplicación como material adsorbente de metales pesados en solución acuosa.

**Palabras clave:** Lignina, adsorción, metales pesados.

## Introducción

Los residuos agroindustriales generalmente están constituidos por biomasa lignocelulósica, la cual estructuralmente es un polímero tridimensional compuesto de material sintetizado de forma natural por las plantas y que, a su vez está compuesta de tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina.

La lignina es un polímero natural amorfo y altamente ramificado; Se origina de varios grupos aromáticos, hidroxilo, fenólicos y tres alcoholes hidroxicinámicos: alcohol *p*-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico. La lignina es estructuralmente bastante compleja, con partes repetitivas dependiendo de la especie de planta y cultivo de origen. Este polímero natural ocupa el segundo lugar en abundancia natural, por lo que se considera como un recurso sostenible, renovable y de gran relevancia económica, además de actuar como bioadsorbente de iones de metales pesados. La lignina es un polímero muy revalorizado en la actualidad gracias a sus diversas aplicaciones ya sean farmacéuticas, cosméticas, industriales, químicas, etc. Gracias a esta facilidad de trabajo, se abre una amplia gama de campos de aplicación para la lignina y sus derivados. (Ge & Li, 2018; José Borges Gomes et al., 2020)

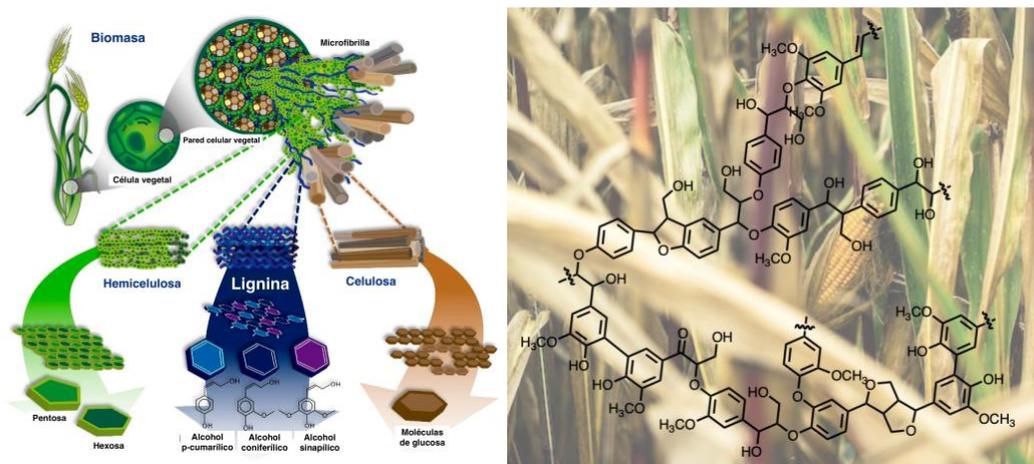


Figura 1: Paja de maíz como fuente de lignina (Tomado de Hernández-Beltrán et al., 2019)

De acuerdo con lo reportado en investigaciones previas, la lignina puede ser sometida a procesos termoquímicos para la obtención de diversos fenoles, aldehídos, cetonas, gases y energía calorífica como potenciales productos con aplicaciones en varias ramas de trabajo. Dentro de las posibles aplicaciones de la lignina se encuentra la rama ambiental en la cual se busca generar una economía circular con los residuos agrícolas e industriales. En este sentido, uno de los potenciales usos de los diversos tipos de lignina es la remoción de iones de metales pesados de aguas residuales gracias a procesos de bioadsorción con lo cual se le otorgaría un valor a un material derivado de residuos y se podría insertar en la economía. (Chávez-Sifontes & Domine, 2013)

Las extracciones de lignina se originan de la separación de la biomasa lignocelulósica, en todos los procesos la lignina se rompe formando fragmentos de bajo peso molecular. Los principales procesos son: lignina Kraft, mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, lignosulfonato de lignina, mezcla de sulfito de metal produciendo un sistema sulfonado soluble en agua donde se degrada mediante una hidrólisis ácida. También se emplea la lignina derivada de organosolvente, la que aísla los carbohidratos de la biomasa empleando solventes orgánicos para solubilizar la lignina.

La técnica que se empleó en este trabajo fue la deslignificación alcalina o hidrólisis básica de lignina. En esencia el componente principal es el licor negro empleado del proceso alcalino, seguido de un proceso de desalinización lo cual hace que se compagine con la técnica de fabricación de pulpa de Kraft, al tener las mismas condiciones y principios básicos con la distinción particular que la técnica de lignina sódica (alcalina) es libre de azufre y de presencia de éteres vinílicos, donde el principio químico aplicado en el proceso de homogeneización de la biomasa es el hidróxido de sodio (NaOH). (José Borges Gomes et al., 2020)

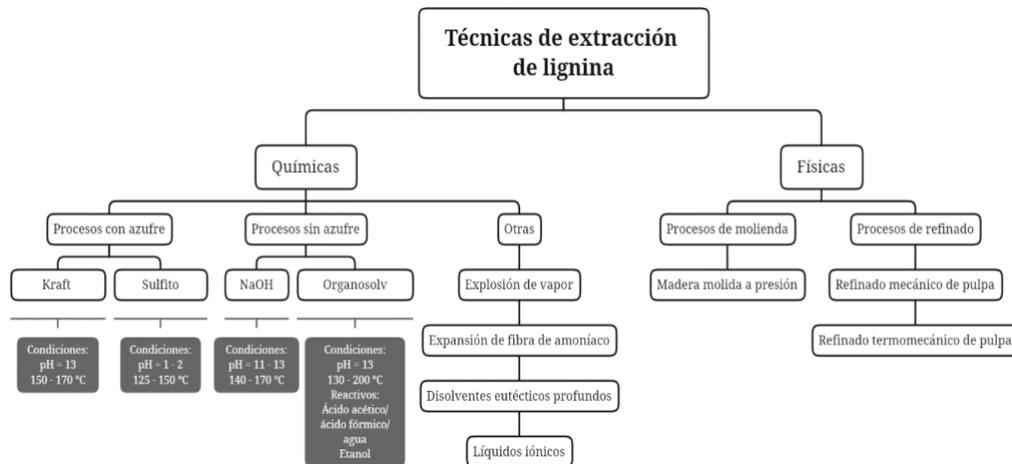


Figura 2: Principales técnicas de extracción de la lignina. (Lobato-Peralta et al., 2021)

Un punto relevante a definir durante esta investigación, es el término “metal pesado” que tiene una amplia definición, pero se puede englobar dentro de la siguiente serie de cualidades y características: Contar con un peso atómico que se encuentre entre 63.5 a 200.6, además de contar con una gravedad específica de 5 g/cm<sup>3</sup>. Cabe remarcar que como tal aún no se define rigurosamente este concepto y pueden existir variaciones. (Carolín et al., 2017)



Figura 3: Metales pesados analizados en este trabajo (tomado de flaticon.es, 2023)

La lignina puede ser utilizada en los procesos de adsorción de metales pesados, que consisten en que el metal de interés se concentre sobre la superficie del adsorbente, en este caso, de la lignina. Una vez que el metal se acumule en la superficie recibe el nombre de fase adsorbida. Comparada con otros métodos para remover iones metálicos, los procesos de adsorción tienen la característica de ser muy utilizados por su bajo costo y alta eficiencia. (Gomez Rengifo et al., 2013)

Hoy en día la contaminación por metales pesados en acuíferos es un gran problema a nivel mundial, tanto a nivel ambiental como del ser humano. La mayor parte de los niveles elevados de metales provienen de fuentes antropogénicas (actividades agrícolas, minería, generación de energía, residuos domésticos), aunque la mayor parte son por naturales derivados de los procesos de meteorización de las rocas. En la *Tabla 1* se describen los efectos en el organismo humano y en el medio ambiente cuando se expone a altas concentraciones de metales pesados.

Enfocando esta problemática en la región bajo, nuestro objetivo a largo plazo es generar técnicas que permitan realizar una quimioremediación en la presa de La Purísima (Guanajuato central). Este cuerpo de agua forma parte de la cuenca hidrológica Lerma-Santiago, que es una de las cuencas más extensas del país. Desde su creación entre los años 1978 y 1979, ha estado afectada por enormes impactos ecológicos producto de la actividad minero-metalúrgica y de las actividades agrícola, industrial y urbana dentro de la zona de la presa, esto provoca que exista un aumento en la concentración los metales pesados en este cuerpo de agua. (García Flores & Zanor, 2016)

*Tabla 1: Impacto negativo en el cuerpo humano y en el medio ambiente originados por una alta exposición a los metales pesados.*

FUENTE: (Carolin et al., 2017; Durán Arroyo, 2011; Prieto Méndez et al., 2009)

Metal	Impacto negativo en el cuerpo humano	Impacto negativo en el ambiente
<b>Zinc (I)</b>	Dolor general del cuerpo, vómito, inflamación de la epidermis, fiebre, anemia y mareos.	Depósitos del metal en los lodos, aumento de la acidez del medio, bioabsorción por flora y fauna y creación de lixiviados.
<b>Cromo (III)</b>	Daño a las capas de la piel, inflamación en la epidermis, daño hepático, fallo renal, congestión pulmonar, necrosis, aparición de úlceras, vómito y alopecia.	Inhibición enzimática, acumulación de lodos, creación de lixiviados y afectaciones en el desarrollo de la flora.
<b>Plomo (II)</b>	Daño en el desarrollo cerebral, fallo renal, fallo en el sistema nervioso, fallo en el sistema circulatorio, retraso mental, cáncer, fallo en el sistema muscular y pérdida de la función muscular voluntaria total.	Desnaturalización de proteínas, reducción o eliminación de flora local, bioacumulación de los iones, daño total o parcial a la fauna local.
<b>Cobre (II)</b>	Daño hepático, anemia, irritación intestinal, pérdida de cabello, dolor de cabeza y fallo renal.	Bioacumulación de iones de cobre en lodos y flora y reducción y/o eliminación de flora local.

Teniendo dos objetivos puntuales que impactarán en la región: primero, revalorizar los residuos de maíz derivados de la industria agrícola de la región al generar materiales adsorbente con alta selectividad y, como segundo objetivo: mejorar la calidad del agua en la región mediante la aplicación de materiales diseñados a partir de técnicas novedosas, como lo es la adsorción de metales pesados en la presa de la purísima mejoría en la calidad del agua otorga varios beneficios para la sociedad, no solo desde el enfoque del humano como consumidor, también para las empresas que emplean este recurso en sus procesos y que buscan realizar un tratamiento para su reúso, pero en específico, habría un impacto positivo al medio ambiente.

Dado que la sociedad tendría un recurso disponible de óptima calidad para la higiene personal, así como para las actividades, se busca contribuir al Objetivo 6 ODS – garantizar la disponibilidad de agua y saneamiento para todos.



*Figura 4: Objetivo de desarrollo sostenible #6 Agua limpia y saneamiento (tomado de un.org, 2023)*

## Metodología

### Extracción de lignina (optimización)

Para desarrollar este proyecto se propuso retomar la metodología publicada en el Verano de la Ciencia XXVII, enfocándose en optimizar las condiciones de reacción para la extracción de la lignina según lo reportado por (Correa Villegas et al., 2022). La fuente de origen de la lignina es paja de maíz proveniente del municipio de Manuel Doblado, Gto. (coordenadas 20°45'08.30"N 101°56'07.31"O). Se seleccionó la paja de maíz debido a que es el mayor residuo agrícola en México, representando un 66.9% del total de residuos agrícolas generados por la industria de cereales. En 2019, se reportó que en el estado de Guanajuato se alcanzó la cantidad de  $1.3 \times 10^6$  toneladas de paja de maíz respecto de las  $25.1 \times 10^6$  toneladas generadas en México. (Serafín Muñoz et al., 2019)

El proceso comienza con una hidrólisis alcalina sobre la biomasa, en este punto se realizó una modificación en la concentración de la solución básica pasando de una solución NaOH 40% m/V a una concentración de NaOH 10 % m/V. Este paso se emplea como un pretratamiento alcalino, lo que ayuda a solubilizar y extraer la lignina de la biomasa a través de la ruptura de enlaces en los grupos acetilos en la hemicelulosa y los enlaces de lignina con carbohidratos de éster. Una de las ventajas de emplear estas condiciones alcalinas es que no se afecta significativamente la estructura aromática de la lignina

Para acelerar la reacción se introduce a ultrasonido por un tiempo de 35 minutos, empleando 7 ciclos de 5 minutos cada uno a una temperatura de 25 °C. Posteriormente se filtra la solución madre obteniendo en sólido a la celulosa y la hemicelulosa. La fase líquida se distingue como un licor negro donde se encuentra solubilizada la lignina. Una vez obtenida la fase líquida, se procede a la disminución del pH de la solución mediante la adición de ácido sulfúrico concentrado transitando de un pH = 14 a pH = 2, para hacer insoluble a la lignina y precipitándola. Posteriormente, se centrifuga la solución durante un tiempo de 30 minutos, después se aísla el sólido de la fase líquida decantando el líquido excedente. El sólido es lavado con agua destilada y finalmente se somete a un secado a temperatura de 50 °C en una estufa, para obtener un sólido café de apariencia fina. (González et al., 2007)

### Prueba de remoción de metales vía adsorción

Para realizar una primera aproximación a la capacidad de remoción de metales pesados con la lignina, se propone realizar una prueba de adsorción contra cuatro metales, Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), Cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ), Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ), Plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ). Se prepararon soluciones acuosas de cada uno de los metales descritos en las concentraciones siguientes:  $\text{Cu}^{2+} = 5$  ppm,  $\text{Cr}^{3+} = 5$  ppm,  $\text{Zn}^{2+} = 1$  ppm y  $\text{Pb}^{2+} = 20$  ppm. A cada solución de 15 mL de la solución se le adicionaron 0.015 g de lignina y se les sometió a agitación mecánica durante 1 h. Posteriormente se filtró la lignina para obtener la fase acuosa, la cual se sometió a ensayos de adsorción atómica para determinar la cantidad de metal presente en la solución remanente posterior a la adsorción

Tabla 2: Límites de detección correspondientes al equipo de absorción atómica Perkin Elmer Pinacle 900F

Metal	Límite inferior	Límite superior
$\text{Cu}^{2+}$	0.08 ppm	5 ppm
$\text{Cr}^{3+}$	0.08 ppm	5 ppm
$\text{Zn}^{2+}$	0.018 ppm	1 ppm
$\text{Pb}^{2+}$	0.2 ppm	20 ppm

Se especifican los límites inferiores y límites superiores del equipo en la *Tabla 2*. Se realizó una curva de calibración de 4 puntos para cada uno de los metales pesados descritos generando los valores de R descritos en la *tabla 4*.

Se analizaron las soluciones remanentes posteriores al proceso de adsorción por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Pinacle 900F, tal como se describe en la *Figura 5*.

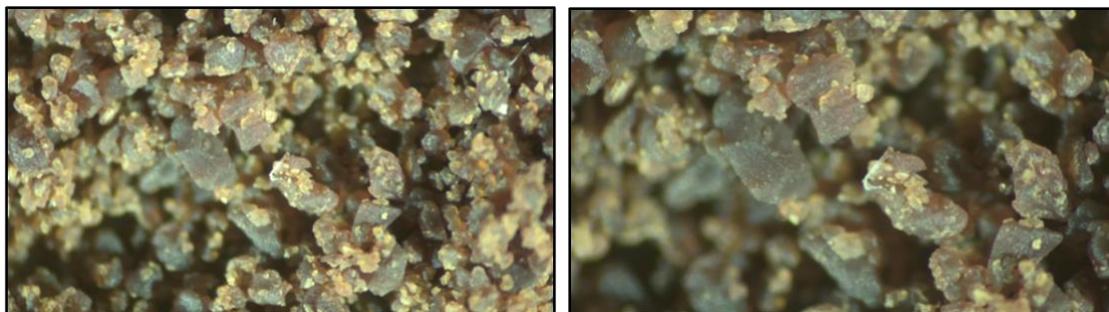


*Figura 5: . Espectrofotómetro de absorción (tomado de Perkin Elmer, 2023)*

## Resultados

Una vez obtenida la lignina empleando la metodología descrita, se llevó a secado a 50 °C por 24 h, finalmente se calculó el rendimiento obtenido, el cual fue de  $\approx 11.0\%$ , lo cual coincide en lo reportado por Serafín-Muñoz en el 2019 para lignina extraída de paja de maíz de Manuel Doblado, Gto.

Una técnica de caracterización cualitativa para la lignina es la microscopía estereoscópica. Esta se llevó a cabo en un microscopio estereoscópico Marca ZEISS, modelo Stemi305 equipado con una cámara para microscopio externa axiocam 208 color. La imagen de la muestra fue tratada en el software ZEN 3.0 (blue edition), © Carl Zeiss Microscopy GmbH, 2019.



*Figura 6: Vista de superficie de la lignina en estereoscopio. Aumento x2.0 y x3.0 (elaboración propia, 2023)*

En la *Figura 6* se puede observar (izquierda) la superficie de la lignina con un aumento de x2.0, mientras que del lado derecho se observa el aumento x3.0. En esta última imagen se observa la superficie característica en forma de agregados de la lignina sódica derivada del maíz

Una de las técnicas para la caracterización de la lignina extraída fue la espectroscopía de infrarrojo FTIR además de la microscopía estereoscópica. El espectro de infrarrojo de la lignina se obtuvo con un espectrómetro Perkin-Elmer One FT-IR empleando el accesorio de reflexión total atenuada (ATR). Cada muestra se analizó de 4000 a 500  $\text{cm}^{-1}$  en una resolución de 2  $\text{cm}^{-1}$  en modo de transmisión. Los espectros fueron editados con el software "Spectragryph - optical spectroscopy", Version 1.2.16.1, licencia gratuita por Menges.

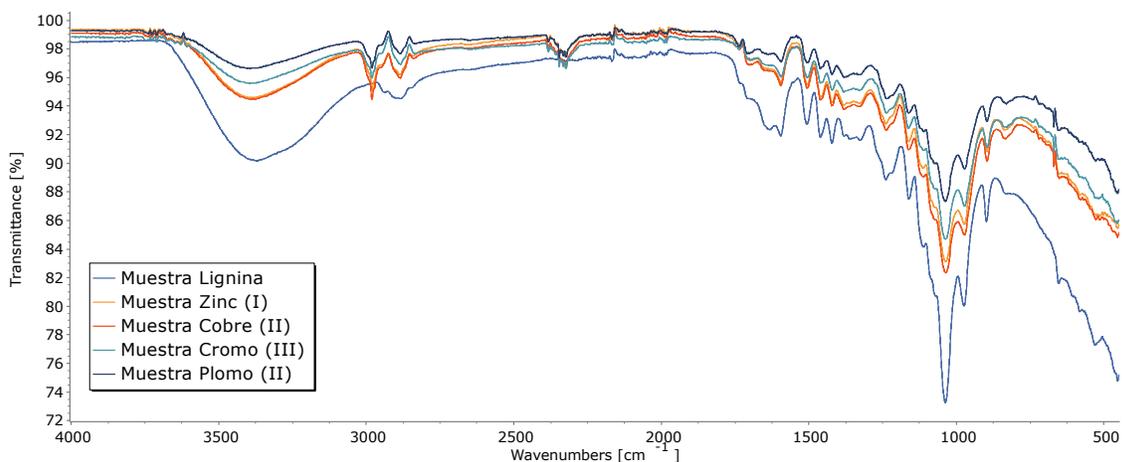


Figura 6: Espectros FTIR correspondientes a muestras de lignina posterior a adsorción de metales pesados. (Elaboración propia)

En la Figura 6 se observa el espectro de FTIR de lignina (línea azul inferior). Las señales se resumen en la tabla 3 donde se pueden apreciar la banda característica de los grupos alifáticos y fenólicos -OH ( $3500-3100\text{ cm}^{-1}$ ), estrechamiento C-H en grupos metilos  $-\text{CH}_3$  y metilenos  $-\text{CH}_2$  ( $2980, 2885\text{ cm}^{-1}$ ), también se observan bandas cortas correspondientes a las vibraciones del esqueleto aromático ( $1620, 1595$  y  $1460\text{ cm}^{-1}$ ), así como las señales próximas a  $1000\text{ cm}^{-1}$  que corresponden a C-H que corresponden a flexión en el plano. Si bien hace falta emplear otras técnicas complementarias para la caracterización de la lignina, este espectro corresponde a las señales mostradas en la lignina comercializada por Sigma-Aldrich.

Tabla 3: Señales FTIR de lignina y enlaces correspondientes

Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Transmitancia ( $\text{cm}^{-1}$ )	Enlace	Movimiento
3372	90.17	O-H	Estiramiento
2885	94.53	C-H	Estiramiento
1595	91.93	C=O, C=C	Vibración del anillo aromático
1506	92.75	C=C	Vibración del anillo aromático
1421	91.41	C-H	Flexión
1327	91.61	C-H, C-O	Flexión y vibración
1239	88.85	C-O	Estiramiento
1037	73.28	C-H	Flexión en plano

Al analizar las señales del FTIR de la lignina pura y cada una de las señales generadas por la lignina remanente del proceso de adsorción de los metales Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), Cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ), Zinc ( $\text{Zn}^{+}$ ), Plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ), se observa que no hay cambios significativos ni en la intensidad de las señales ni en la forma o en la posición de las señales. Con lo cual se puede inferir que ningún grupo funcional de la lignina estableció alguna interacción con los metales pesados descritos.

Dentro de la primera aproximación a la capacidad de adsorción de la lignina sobre metales pesados, se emplearon las condiciones descritas en la Tabla 2. Cabe resaltar, de acuerdo con lo reportado por Gomez Rengifo et al., 2013 la lignina sí se ha comportado como adsorbente de metales pesados bajo condiciones específicas. En el caso de la primera aproximación de la prueba de adsorción se analizaron cuatro metales Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), Cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ), Zinc ( $\text{Zn}^{+}$ ), Plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ).

Tabla 4: Condiciones para la prueba de remoción de metales

Metal	T (°C)	Tiempo	pH	Concentración de lignina	Concentración inicial de metal	Concentración final de metal	R (4 puntos)
Cu <sup>+2</sup>	25 °C	1 h	7.0	0.015 g	5 ppm	≈ 4.8 ppm	0.9982
Cr <sup>+3</sup>	25 °C	1 h	7.0	0.015 g	5 ppm	≈ 4.7 ppm	0.9986
Zn <sup>+1</sup>	25 °C	1 h	7.0	0.015 g	1 ppm	≈ 1 ppm	0.9994*
Pb <sup>+2</sup>	25 °C	1 h	7.0	0.015 g	20 ppm	≈ 18 ppm	0.9997

Para el caso del Cu (II), este se disolvió para generar una solución de concentración 5 ppm a la cual se le adicionó 0.015 g de lignina para realizar la prueba de adsorción a 25 °C. Esta mezcla se sometió a agitación mecánica durante 1 h a un pH = 7.0, posterior al término del tiempo de contacto, se aisló la fase acuosa por filtración y se sometió una prueba de adsorción atómica. El resultado bajo las condiciones de la Tabla 2, es que no se observa una adsorción significativa, dado que en la solución remanente se obtuvo una lectura de ≈ 4.8 ppm de Cu(II).

Siguiendo el protocolo descrito, para el caso de Cr (III) el resultado de concentración final de metal, bajo estas condiciones, no es significativa la adsorción de metal. Así mismo para el Zn(I), la concentración de metal remanente en la solución es prácticamente igual a la concentración inicial del metal. Finalmente, para Pb (II), utilizando la misma metodología, resulta en que la diferencia entre las concentraciones del metal es mínima, por lo que no se cuantifica una adsorción significativa.

Los resultados anteriores indican que a 25 °C, durante un tiempo de contacto de 1 hora a un pH neutro sin variación en la concentración de lignina no hay adsorción significativa de metales pesados en la lignina. En este sentido, se contempla realizar un barrido de condiciones para determinar cuáles son las óptimas para que ocurra el proceso de adsorción de metales pesados en la lignina.

## Conclusiones

Se optimizó el protocolo diseñado por el grupo de investigación para la obtención y purificación de lignina, disminuyendo drásticamente el uso de NaOH en la solución para la hidrólisis alcalina. La caracterización de la lignina se llevó a cabo por dos metodologías FTIR y microscopía estereoscópica. El primer ensayo de adsorción de metales en lignina bajo las condiciones descritas mostró que no ocurre la adsorción cuantitativamente significativa, sin embargo con la cantidad de experimentos desarrollados no se puede establecer una conclusión certera sobre el comportamiento de la lignina como adsorbente de metales pesados.

## Perspectivas

El proyecto se enfocará en determinar las condiciones óptimas en las que ocurra la adsorción de metales pesados empleando la lignina extraída. También se desarrollará una caracterización complementaria empleando otras técnicas para determinar la calidad de la lignina obtenida. Así mismo se explorará la modificación estructural de la lignina mediante síntesis orgánica para realizar cambios de grupos funcionales y así incrementar la posible adsorción de metales así como generar un material adsorbente-desorbente reusable y económicamente sustentable.

## Agradecimientos

El grupo de investigación agradece los apoyos recibidos para el desarrollo de este proyecto: A Veranos UG, a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado. A la División de Ingenierías por los consumibles suministrados y la infraestructura disponible. A la Dra. Alma Hortensia Serafín Muñoz por las nutritivas discusiones y la infraestructura del Laboratorio de Ambiental II. Al Laboratorio de Evaluación Toxicológica y Riesgos Ambientales (LETRA) a cargo de Dr. Gustavo Cruz Jiménez y QFB. Claudia Karina Sánchez de la DCNE por la espectrofotometría de infrarrojo. A la empresa VISE-León, en particular al Ing. Juan Manuel Aguilar Morón y Q. Jorge Díaz por la colaboración y las facilidades otorgadas en el uso del laboratorio de asfaltos. Al desarrollador F. Menges creador del software para el tratamiento del FTIR "Spectragryph - optical spectroscopy software", Version 1.2.16.1, 2023, <http://www.ffmpeg2.de/spectragryph/> bajo la licencia gratuita en el uso del software *Spectragryph* para el tratamiento de los espectros de infrarrojo

## Bibliografía/Referencias

- Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J., & Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 5, Issue 3, pp. 2782–2799). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL LIGNIN, STRUCTURE AND APPLICATIONS: DEPOLYMERIZATION METHODS FOR OBTAINING AROMATIC DERIVATIVES OF INDUSTRIAL INTEREST. In *Av. cien. ing* (Vol. 4, Issue 4). Chávez-Sifontes & Domine. [http://www.exeeedu.com/publishing.cl/av\\_cienc\\_ing/15](http://www.exeeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/15)
- Correa Villegas, A. B., Huerta Delgado, J. J., Monjaraz Ortigoza, S. G., Salazar Plascencia, A. E., Torres Hernández Ivanna, & Cano, P. A. (2022). Revalorización de lignina funcionalizada con potencial aplicación en tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 16.
- García Flores, M. E., & Zanor, G. A. (2016). EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS TRAZA EN SEDIMENTOS DE LA PRESA LA PURÍSIMA (GUANAJUATO). *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), 475–479.
- Ge, Y., & Li, Z. (2018). Application of Lignin and Its Derivatives in Adsorption of Heavy Metal Ions in Water: A Review. In *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (Vol. 6, Issue 5, pp. 7181–7192). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01345>
- Gomez Rengifo, V. E., Velásquez Jiménez, J. A., & Quintana Marín, G. C. (2013). LIGNINA COMO ADSORBENTE DE METALES PESADOS. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 7(2), 74–85.
- González, A. M., Herrera, J. P., & Rodríguez, A. M. (2007). CARACTERIZACIÓN DE FRACCIONES DE LIGNINA EXTRAÍDAS DEL LICOR NEGRO CON SOLVENTES ORGÁNICOS.
- Hernández-Beltrán, J. U., Hernández-De Lira, I. O., Cruz-Santos, M. M., Saucedo-Luevanos, A., Hernández-Terán, F., & Balagurusamy, N. (2019). Insight into pretreatment methods of lignocellulosic biomass to increase biogas yield: Current state, challenges, and opportunities. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 18). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9183721>
- José Borges Gomes, F., de Souza, R. E., Brito, E. O., & Costa Lelis, R. C. (2020). A review on lignin sources and uses. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 100–105. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00222>
- Lobato-Peralta, D. R., Duque-Brito, E., Villafán-Vidales, H. I., Longoria, A., Sebastian, P. J., Cuentas-Gallegos, A. K., Arancibia-Bulnes, C. A., & Okoye, P. U. (2021). A review on trends in lignin extraction

and valorization of lignocellulosic biomass for energy applications. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 293). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126123>

Margarita Durán Arroyo, M., & Alejandro Ciabato Jiménez, D. (2011). *Evaluación de los impactos ambientales asociados a la contaminación en agua, suelo y sedimento por cromo y zinc, en los municipios de Tabío y Tenjo - Cundinamarca (sub - cuenca del Río Chicú)*. <https://ciencia.lasalle.edu.co/>

Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29–44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>

Serafín Muñoz, A. H., Molina Guerrero, C. E., Gutierrez Ortega, N. L., Leal Vaca, J. C., Alvarez Vargas, A., & Cano Canchola, C. (2019). Characterization and Integrated Process of Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Straw. *Waste and Biomass Valorization*, 10(7), 1857–1871. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0218-9>