

## Revalorización de lignina (Fase III). Síntesis de material adsorbente derivado de Lignina-tetrazol

Lignin revalorization, Phase III: Synthesis of a novel lignin-tetrazole-based adsorbent material

Alvarado Villafan, Aura Cristina.<sup>1</sup> Barrientos Rico, Zaira Valeria.<sup>1</sup> Cerrito Florencio, Brian Carlos.<sup>2</sup> Huerta Delgado, Jaime Juan.<sup>1</sup>

Morales Hernández, Hannah Sofia.<sup>1</sup> Rico Velázquez, Paulina Jocelyn.<sup>1</sup> Cano, Pedro A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato. <sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Campus Celaya-Salvatierra, Campus Guanajuato.

[ac.alvaradovillafan@ugto.mx](mailto:ac.alvaradovillafan@ugto.mx), [zv.barrientosrico@ugto.mx](mailto:zv.barrientosrico@ugto.mx), [bc.cerritoflorencio@ugto.mx](mailto:bc.cerritoflorencio@ugto.mx), [jj.huerta.delgado@ugto.mx](mailto:jj.huerta.delgado@ugto.mx), [hs.moraleshernandez@ugto.mx](mailto:hs.moraleshernandez@ugto.mx), [pj.ricovelazquez@ugto.mx](mailto:pj.ricovelazquez@ugto.mx), [pa.cano@ugto.mx](mailto:pa.cano@ugto.mx)

### Resumen

La paja de maíz es un residuo agroindustrial de poco valor comercial que se produce en grandes cantidades en el bajío guanajuatense. La lignina es un biopolímero complejo y abundante en el maíz que ha ganado un creciente interés en los últimos años debido a su potencial actividad química en la adsorción de metales pesados presentes en aguas contaminadas. Uno de los grupos funcionales presentes en la lignina que es responsable de su actividad quelante es el hidroxilo de fenol. La modificación química en la lignina del grupo funcional hidroxilo a tetrazol tiene el potencial de aumentar su capacidad de adsorción de metales pesados, así como su valoración comercial como material adsorbente.

**Palabras clave:** Maíz, Lignina, Tetrazol, Revalorización

### Introducción

Grandes cantidades de residuos agroindustriales están compuestos por lignocelulosa, aunque depende del tipo de material de origen, su estructura se compone principalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina. Los monómeros de hemicelulosa se unen principalmente mediante enlaces  $\beta$ -1,4, las cadenas de hemicelulosa interactúan con la celulosa a través de puentes de hidrógeno y se conectan covalentemente con la lignina (Caicedo-Jiménez, 2023). La lignina (*Figura 1*) es un polímero de estructura compleja esto depende de acuerdo con el origen y método de separación, de modo que se pueden generar una amplia diversidad de polímeros aromáticos de lignina (Abdelaziz & Hulteberg, 2017). Los principales componentes de este polímero son los grupos funcionales tales como hidroxilos, fenoles, grupos carboxilos, entre otros. Pero se puede hacer una clasificación según la presencia de alcoholes precursores: alcohol *p*-cumarilílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico (Gomez Rengifo *et al.*, 2013).

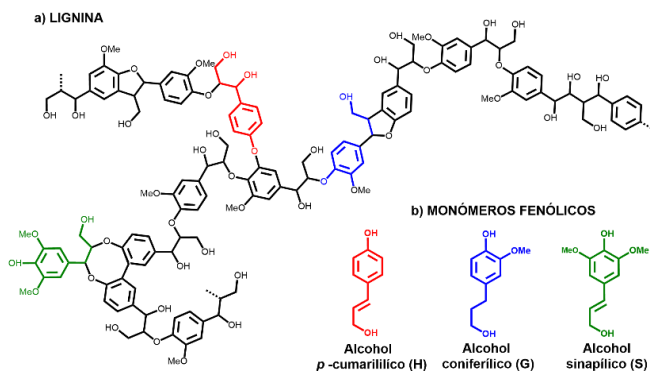


Figura 1: Estructura química de la lignina. (Elaboración propia, 2024)

La lignina, debido a su naturaleza aromática, es un compuesto que absorbe radiación ultravioleta. Sus espectros UV-vis suelen mostrar máximo de absorción alrededor de 280 nm, 230 nm y 210 nm. Si bien la espectroscopía UV es útil para

distinguir entre diferentes tipos de ligninas, esta técnica se limita a la comparación cualitativa. La espectroscopia infrarroja (FTIR) en el rango de  $4000-400\text{cm}^{-1}$  es una herramienta valiosa para la caracterización cualitativa de la lignina porque permita la identificación de grupos funcionales presentes. (Gomez Rengifo *et al.*, 2013)

En la actualidad, la lignina ha tomado importancia en las investigaciones al ser uno de los productos capaz de ser revalorizado mediante la transformación de los residuos agrícolas empleando métodos químicos y biológicos. Este producto ofrece amplias posibilidades de aplicación, por ejemplo, es necesario separar la lignina de la biomasa para la producción de combustibles celulósicos; para producir energía minimizando costos, las biorrefinerías y la industria papelera quemar la lignina que es generada como subproducto en sus procesos. En las resinas fenólicas se ha propuesto sustituir el fenol químico por el fenol de la lignina (Espinoza-Acosta *et al.*, 2022). Además, la lignina posee la capacidad de adsorber metales pesados debido a que en su superficie se encuentran fenoles y varios grupos funcionales, entre ellos destacará uno que tenga más afinidad con un ión metálico. Pero también esto se le atribuye a las fuerzas de atracción electrostática entre la superficie de la lignina y el ión metálico (Ge & Li, 2018; José Borges Gomes *et al.*, 2020). Para maximizar su valor comercial, es fundamental evaluar la ruta más eficiente en términos de costos y factores ambientales (González *et al.*, 2007). Esta capacidad de adsorción de iones de metales pesados puede aumentar significativamente después de la modificación de grupo funcional; en este contexto, existen reportes en la literatura que muestran que la inclusión del núcleo del tetrazol tiene el potencial de aumentar la capacidad de quelar cationes (Chen *et al.*, 2020).

Los tetrazoles (Figura 2) son núcleos representativos de compuestos poli-aza-heterocíclicos formados por un anillo de cinco miembros integrado por cuatro átomos de nitrógeno y uno de carbono. Estos compuestos heterocíclicos no están presentes en la naturaleza. De manera muy interesante, los tetrazoles son los compuestos heterocíclicos estables que tienen el número más alto de átomos de nitrógeno en su estructura.

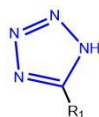


Figura 2: Estructura química del tetrazol. (Elaboración propia, 2024)

El núcleo del tetrazol ha tomado notoriedad en los últimos años puesto que es una plataforma sintética con aplicaciones en numerosos campos como química orgánica, química de coordinación, agricultura, industria fotográfica y automotriz. En este trabajo, la aplicación del tetrazol, será enfocada a la investigación a la química de los materiales, específicamente a su inclusión en la estructura de la lignina con su potencial aplicación en la adsorción de metales pesados.

## Metodología

En el desarrollo de este proyecto se retomó la metodología publicada en el Verano de la Ciencia de la XXVIII, con el objetivo de optimizar las condiciones de reacción para la extracción de lignina según lo reportado por Rico Velázquez *et al.*, 2023. La fuente de origen de la lignina es paja de maíz que proviene del municipio de Manuel Doblado, Guanajuato. Las coordenadas de ubicación ( $20^{\circ}45'08.30''\text{N } 101^{\circ}56'07.31''\text{O}$ ). El mayor residuo agrícola en el bajío de México es paja de maíz representado 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 a las  $25.1 \times 10^6$  toneladas generadas en México; por lo tanto, seleccionamos paja de maíz con propósito de revalorización de la lignina. (Serafín Muñoz *et al.*, 2019)



Imagen 1: Imagen Satelital de Ciudad de Manuel Doblado. (fuente Google Maps, 2024)

#### Extracción de lignina a partir de paja de maíz

El proceso que se llevará a cabo se denomina como deslignificación alcalina, la cual se basa en la separación de la lignina mediante el uso de soluciones alcalinas como el hidróxido de sodio (NaOH), este método provoca la ruptura de los enlaces entre la lignina, celulosa y hemicelulosa.

Se prepara una solución de 10 mL de NaOH a 10% *m/V*, posteriormente se miden 10 g de paja de maíz molida (20 mallas) para después verterla en un matraz de fondo redondo de 250 mL. Posteriormente se añade agua corriente para hidratar la paja de maíz, aproximadamente se usan 100 mL. La mezcla se mantiene en agitación mecánica por 30 minutos a temperatura ambiente. A continuación, se adicionan 20 mL de NaOH 10% *m/V* a la solución de paja de maíz la cual se mantiene en agitación mecánica durante 3 horas. Una vez que termina la reacción, la solución se filtra para posteriormente enjuagar con agua y etanol. La fracción líquida aislada se acidifica adicionado gota a gota una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [1.0M]. En este punto se observará un cambio de color del licor negro a café claro con precipitado del mismo color. Finalmente se mide el pH para que comprobar que tiene pH= 2, la mezcla obtenida se centrifuga durante 30 minutos a 3000 rpm, después se aísla el sólido de la fase líquida decantado el líquido excedente. El sólido se introduce en la estufa de secado por 4 horas a 65 °C y por último se mide la masa obtenida para calcular el rendimiento.



Figura 3: Esquema general de extracción y caracterización de la lignina. (Elaboración propia, 2024)

### Síntesis de tetrazol unido a lignina

Siguiendo el procedimiento propuesto por Chen *et al.*, 2020, (Figura 4) la ruta sintética comienza por la modificación por cianoeterificación de la lignina utilizando 0.5 g de lignina pulverizada que se pone en contacto en acrilonitrilo, la mezcla se deja en agitación constante a temperatura ambiente, posterior a 3 horas de reacción se aísla el sólido precipitado de la fase líquida decantando el líquido excedente. El sólido remanente se lava con agua y etanol, por separado, finalmente se somete a un secado a 65°C en una estufa.

Para sintetizar el núcleo de tetrazol se propone emplear la lignina cianoeterificada como sustrato, se agrega NH<sub>4</sub>Cl y NaN<sub>3</sub> en dimetilformamida (DMF) como disolvente en un matraz y se deja en agitación constante a 80°C durante 1 hora. El sólido remanente se lava con agua y se deja secar en una estufa a 65°C.

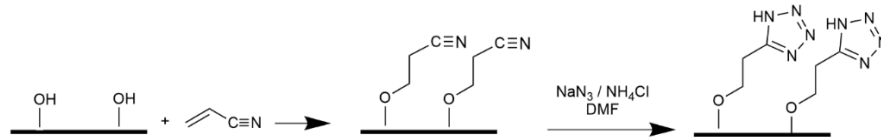


Figura 4: Propuesta de síntesis de tetrazol a partir de lignina. (Elaboración propia, 2024)

## Resultados

### Extracción y Caracterización de la lignina

Generalmente la lignina es considerada como un desecho de la industria agrícola, por lo cual es necesario revalorizar este residuo generándole un valor añadido. La lignina de paja de maíz igual que otras contiene una gran cantidad de grupos hidroxilo que presentan una gran afinidad con algunos metales pesados (Chen *et al.*, 2020a).

El protocolo de extracción de lignina comienza con un pretratamiento de la paja de maíz, en el que pasa por un proceso de tamizado a 100 mallas, después de procesada la misma tiene un color beige dorado, de textura rugosa, formas irregulares. (Imagen 1a)

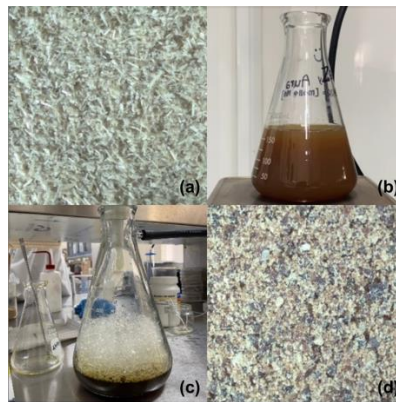


Imagen 1: a) Microscopía estereoscópica aumento x0.8 de muestra de paja tamizada 100 mallas, b) Mezcla de lignina en solución de NaOH, c) Licor negro filtrado, d) Microscopía estereoscópica x0.8 de lignina extraída. (Elaboración propia, 2024)

Posteriormente, la paja de maíz se hidrató seguido de un tratamiento alcalino con NaOH 10% *m/V* mientras se mantiene en agitación durante 3 h. En este proceso se logró observar un cambio de la mezcla inicial (agua con paja de maíz) de una coloración marrón a una mezcla color marrón oscuro. (Imagen 1b) Al término de la reacción esta mezcla se filtró al vacío, separando en la fracción sólida a la celulosa y parte de la hemicelulosa. Mientras que en la fracción líquida se encuentra la lignina solubilizada con trazas de hemicelulosa, a la cual por su color café oscuro comúnmente se le denomina licor negro. (Figura 1c)

Al licor negro se le adicionó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [1.0 M] gota a gota para acidificar la solución hasta alcanzar un pH de 2.0, este cambio genera que la lignina sea insoluble en la solución. Particularmente, en el cambio de acidez se puede observar que la solución cambió de la coloración además de la formación de partículas suspendidas en la solución (lignina).



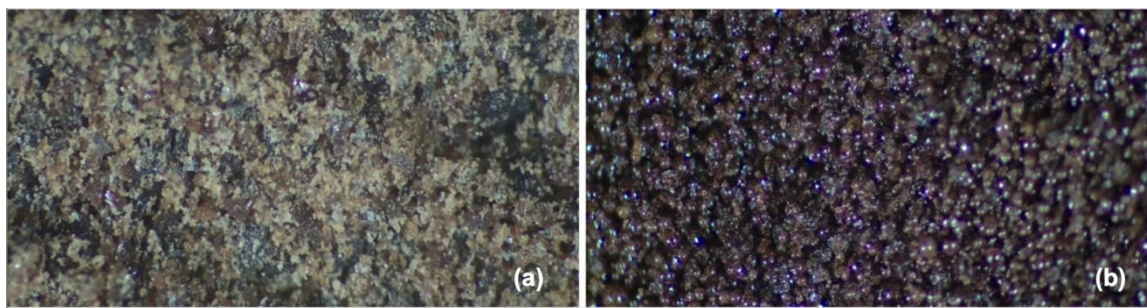
Posteriormente se separó la lignina de la solución por medio de centrifugación, decantado y secado en estufa a 65 °C por 3 h. Finalmente, la lignina se somete a un proceso de pulverización para ser caracterizada.

#### *Caracterización y comparación de Lignina 2024 y Lignina Estándar*

La caracterización de la lignina se hizo mediante espectroscopia UV-Vis y FTIR: con el fin de observar su composición química y determinar la efectividad del protocolo experimental, además se hizo una microscopía estereoscópica para explorar la superficie tanto de la lignina extraída como de un estándar de lignina. Para ello se hizo uso de una lignina estándar adquirida de la marca Sigma-Aldrich.

#### *Microscopía estereoscópica*

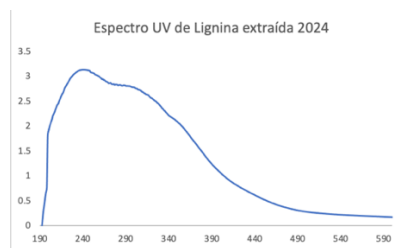
La microscopía se realizó con un microscopio estereoscópico marca ZEISS, modelo Stemi 305 equipado con una cámara para microscopio externa axiocam 208 color. En la *Imagen 2* se observa (a) la lignina extraída durante el verano 2024 y (b) la lignina estándar de Sigma-Aldrich. En la lignina a) se observan formas irregulares en fragmentos de color marrón oscuro de la lignina obtenida con partículas color arena que podría tratarse lignina más pulverizada, posiblemente debido a que el método de trituración y molienda que se utilizó fue el de un mortero convencional sin tamizar el polvo. Por lo que es normal esperar que la muestra no sea triturada de manera homogénea y, por lo tanto existan partículas de diferentes tamaños. En la figura b) tenemos la lignina estándar Sigma-Aldrich, en la cual podemos observar una estructura más homogénea además de formas regulares que difieren de tamaño, estas últimas son menos perceptibles a simple vista, pero se logran ver como puntos muy brillantes por toda la superficie. Su forma circular puede deberse a un proceso de más especializado de granulación homogénea.



*Imagen 2: Microscopía estereoscópica de a) de Lignina Verano 2024, x4.0 y b) Lignina Estándar, x4.0. (Elaboración propia, 2024)*

#### *Espectroscopia UV-Vis*

En el proceso de análisis de la espectrofotometría se realizó con un equipo Spectrophotometer modelo Ve-5100UV de la marca VELAB. En el espectro de UV se puede observar que la máxima absorción a 190 nm mientras que se puede observar otro pico de absorción en 300 nm. (*Gráfica 1*)



*Gráfica 1: Espectro de absorción UV de Lignina extraída 2024*

#### *Espectroscopia Infrarrojo FTIR*

La espectroscopia “Transformada de Fourier Infrarroja” por sus siglas en inglés FTIR nos ayuda a analizar la composición química de la muestra pues nos ayuda a identificar y clasificar compuestos orgánicos por sus grupos funcionales además

de sus enlaces específicos en la muestra y podemos comparar los resultados obtenidos con los de un control, que en este trabajo fue la lignina estándar de Sigma Aldrich. El equipo empleado fue un Perkin Elmer Spectrum Two (UATR) utilizando el dispositivo de reflexión total atenuada (ATR), mientras que el análisis de los espectros se realizó con ayuda del software Spectragryph versión 1.2.

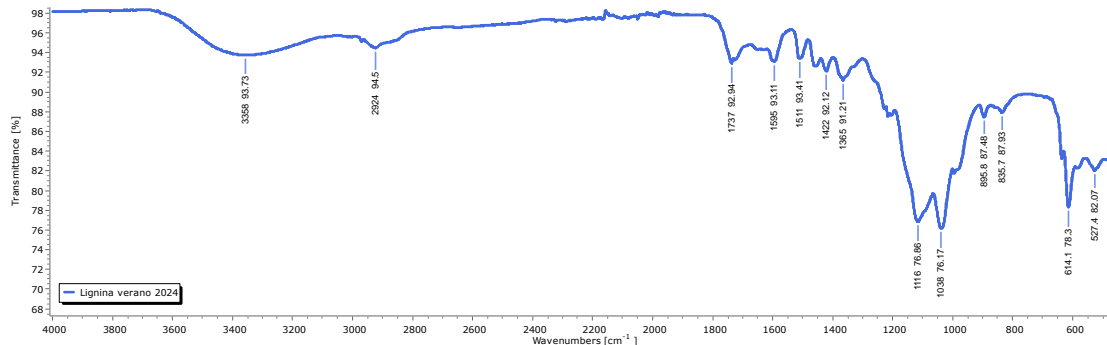


Figura 5: Espectro de FTIR del compuesto lignina verano 2024.

De el compuesto “Lignina verano 2024” se obtuvo el espectro FTIR (Figura 5) donde se observaron las bandas características del espectro infrarrojo para el polímero de lignina (Espinoza-Acosta *et al.*, 2022). Se observa una banda pronunciada que aparece en  $3358\text{ cm}^{-1}$  que pertenece a los grupos -OH, también podemos observar la línea consecutiva en los  $2924\text{ cm}^{-1}$  lo cual nos da indicio de un rango de  $3000\text{-}2840\text{ cm}^{-1}$  se da el estiramiento del grupo C-H en  $2924\text{ cm}^{-1}$  más específicamente entra en el ciclo hexano que es parte de los anillos aromáticos que pertenecen a los monómeros de la lignina. Enseguida podemos observar una banda en los  $1737\text{ cm}^{-1}$  lo que nos indica la presencia de grupos alicíclicos es decir ciclo alcanos C=C en estiramiento, pudimos observar más bandas en  $1595, 1511, 1422\text{ cm}^{-1}$  nos indican la vibración de esqueletos de compuestos aromáticos (anillos de benceno),  $1365\text{ cm}^{-1}$  pertenece a grupo alcano con grupos metilos C=C en estiramiento,  $1116, 1038\text{ cm}^{-1}$  nos indica compuestos heterocromáticos estiramiento de grupos C-O, el resumen del grupo funcional. (Tabla 1)

Tabla 1: Señales FTIR de lignina verano 2024 y enlaces correspondientes

Numero de onda (cm-1)	Enlace	Tipo de Movimiento
3358	-OH	Estiramiento
2924	C-H	Estiramiento
1737	C=O	Estiramiento
1595	C=O	Vibración
1511	C=O	Vibración
1422	C-H	Vibración
1365	C=O	Estiramiento
1116	C-O	Estiramiento
1038	C-O	Deformación

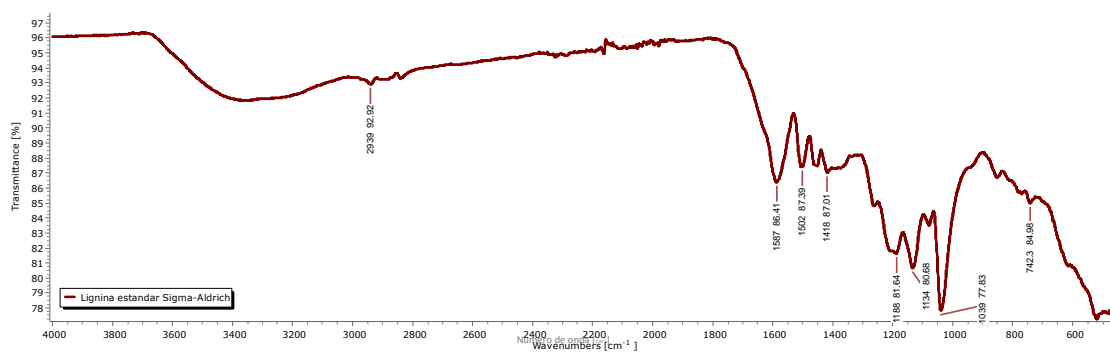


Figura 6: Espectro de FTIR del compuesto lignina estandar Sigma-Aldrich.

En seguida se revisó la composición orgánica de la lignina estándar para poder llevar la comparación de la presencia de los grupos funcionales, en la *Figura 6* tenemos el espectro FTIR de la lignina estándar, de izquierda a derecha la primera línea está en los  $3358\text{ cm}^{-1}$  podemos observar la banda característica de los grupos -OH normalmente presentes en las ligninas, posteriormente tenemos los  $2924\text{ cm}^{-1}$  que corresponden a los grupos metileno y metoxilo, en  $1737\text{ cm}^{-1}$  a grupos carbonilos,  $1595, 1511, 1422\text{ cm}^{-1}$  las vibraciones del esqueleto de benceno, el grupo alquilo de los metilos en  $1365\text{ cm}^{-1}$ , en  $1134\text{ cm}^{-1}$  con los grupos ester. Si se hace una comparativa entre los espectros infrarrojos obtenidos podemos asumir la similitud entre el número de onda de ambas muestras, lo que permite una caracterización cualitativa que en esencia podemos determinar que se trata de una lignina, es decir se logró de forma satisfactoria la síntesis.

Tabla 2: Señales FTIR de lignina estandar Sigma-Aldrich y enlaces correspondientes

Numero de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Enlace	Movimiento
3368	-OH	Estiramiento
2939	C-H	Estiramiento
1587	C=O	Vibración
1502	C=O	Vibración
1418	C-H	Vibración
1188	C-O-C	Estiramiento
1134	C-O	Estiramiento
1039	C-O	Deformación

#### Resultados de tetrazol-lignina

La parte central de este proyecto radica en la unión de la lignina con tetrazol, proceso que se llevó a cabo mediante una serie de reacciones controladas que permitieron la modificación química de los grupos funcionales hidroxilo de la lignina. (*Figura 7*)

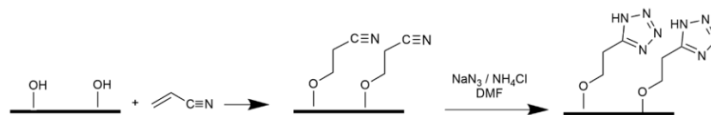
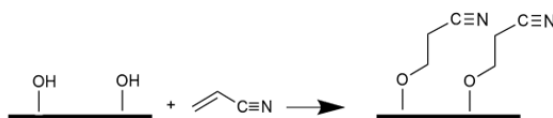


Figura 7: Propuesta de síntesis de tetrazol a partir de lignina.

En la primera etapa, se modificaron los grupos funcionales hidroxilo por un grupo nitrilo en la superficie de la lignina. (*Figura 8*) El proceso se desarrolló en un matraz redondo en donde se colocaron 0.5 g de lignina con 5 mL de acrilonitrilo y se mantuvo en agitación constante por 3 horas a temperatura ambiente. Al inicio de la reacción, la lignina sólida presenta

un color café oscuro. Posterior al tiempo de reacción, el color cambia a un café claro grisáceo, como se muestra en la *Imagen 3*.

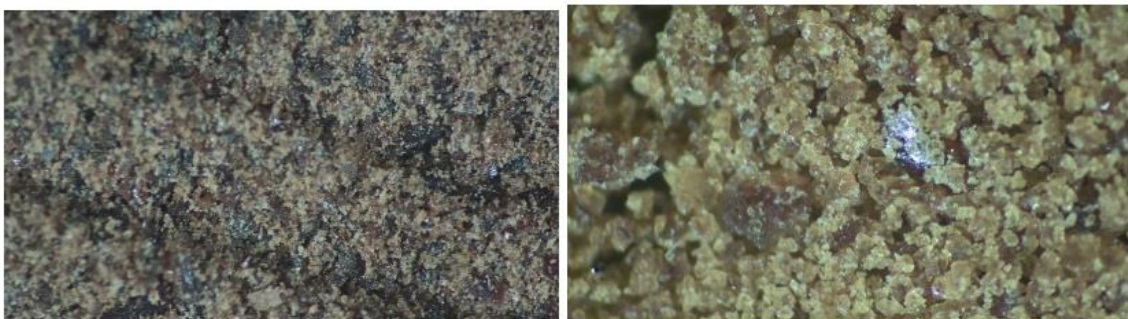


*Figura 8. Cianoeterificación de lignina*



*Imagen 3: Vista de reacción antes y después de la cianoeterificación de lignina*

Por medio de la técnica cualitativa de microscopía estereoscópica se exploró la superficie de la lignina como material de partida y también la superficie del producto lignina con el grupo nitrilo. La imagen de la muestra fue tratada en el software ZEN 3.0 (blue edition), © Carl Zeiss Microscopy GmbH, 2019.



*Imagen 4: Vista de superficie de la lignina (izquierda) y lignina cianoeterificada (derecha) en estereoscopio. Aumento x4.0*

En la *Figura 10* se muestra a la izquierda la superficie de la lignina extraída por deslignificación alcalina con un aumento de x4.0. En la que se observa una superficie color café oscuro, rugosa y granular, con variabilidad en el tamaño de partícula. Este aspecto es característico de la lignina en su estado natural o poco modificado (Maceda *et al.*, 2021). Por otro lado, en la imagen de la derecha se observa lignina cianoeterificada con un aumento de x4.0. Es notorio que la superficie muestra un color café claro con apariencia menos rugosa pero conservando los conglomerados granulares, teniendo una apariencia más uniforme, indicando la modificación en la superficie de las partículas debido al proceso de cianoeterificación. Esta imagen sugiere que el proceso de cianoeterificación ha alterado la morfología superficial de la lignina.

En el segundo paso, se sintetizaron tetrazoles en la superficie de la lignina mediante la reacción de ciclación [3 + 2] de nitrilo orgánico con azida de sodio (NaN<sub>3</sub>), en presencia de NH<sub>4</sub>Cl en DMF como disolvente obteniendo un sólido granular en un aproximado de 14% de rendimiento, esto para las condiciones de reacción iniciales. (*Figura 11*) Una vez transcurrida la reacción los cambios físicos que se muestran a comparación de la lignina cianoeterificada y a la unida con



tetrazol, el remanente pulverizado presenta un vire a café más claro al compararlo con la lignina cianoesterificada. La lignina unida a tetrazol es un polvo más fino, mientras que la lignina cianoesterificada es más granular.

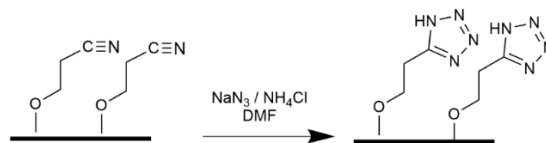


Figura 9. Lignina Cianoesterificada unida a tetrazol

Se realizó el análisis cualitativo mediante la técnica de microscopia estereoscópica de la muestra lignina tetrazol, en un aumento x4.0, presentando un color café claro homogéneo con matices suaves, en contraste con la lignina cianoesterificada, mostrando textura granular y fina con partículas pequeñas, siendo estas de de forma regular, con bordes redondeados y una estructura compacta. La disparidad entre la lignina cianoesterificada muestra menos reflejos brillantes debido a su superficie más irregular, mientras que la lignina-tetrazol tiene un brillo ligeramente mayor, del mismo modo, la apariencia entre la lignina tetrazol es más cohesiva y homogénea mientras que la lignina cianoesterificada es más fragmentada y heterogénea, como se observa en la (Imagen 5)

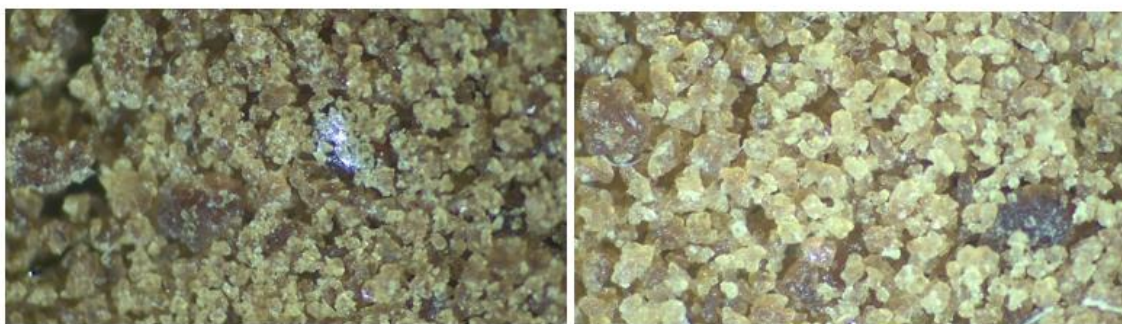


Imagen 5: Vista de superficie de la lignina Cianoesterificada (izquierda) y lignina tetrazol (derecha) en estereoscopio. Aumento x4.0

En la Imagen 6 se muestran los espectros FTIR de la lignina modificada con tetrazol. Se observa la señal característica de hidroxilos, lo cual puede indicar que en el producto aún persiste la presencia de grupos OH, señalando que la reacción de modificación de OH a tetrazol aún no había concluido. También se observa una señal en  $2920\text{ cm}^{-1}$  que se debe a la vibración de estiramiento C-H del grupo metileno, presente en la nueva cadena alifática que conecta al O de éter con el tetrazol. La señal de  $1653\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a la vibración de estiramiento del C=N presente en el tetrazol. Otras señales características de este anillo nitrogenado se observan como picos a  $1480\text{ cm}^{-1}$ , una señal intensificada en  $1388\text{ cm}^{-1}$  correspondientes a las vibraciones de estiramiento y flexión C=N del característico anillo tetrazol. Además se observa una intensificación en la señal en  $1036\text{ cm}^{-1}$  que se atribuye a una deformación del enlace C-O.

Tabla 3: Señales FTIR de lignina verano 2024 y enlaces correspondientes

Numero de onda (cm-1)	Enlace	Tipo de Movimiento
3354	-OH	Estiramiento
2920	C-H	Estiramiento
1653	C=N	Estiramiento
1480	C-N	Estiramiento
1388	C=N	Estiramiento
1116	C-O	Estiramiento
1036	C-O	Deformación

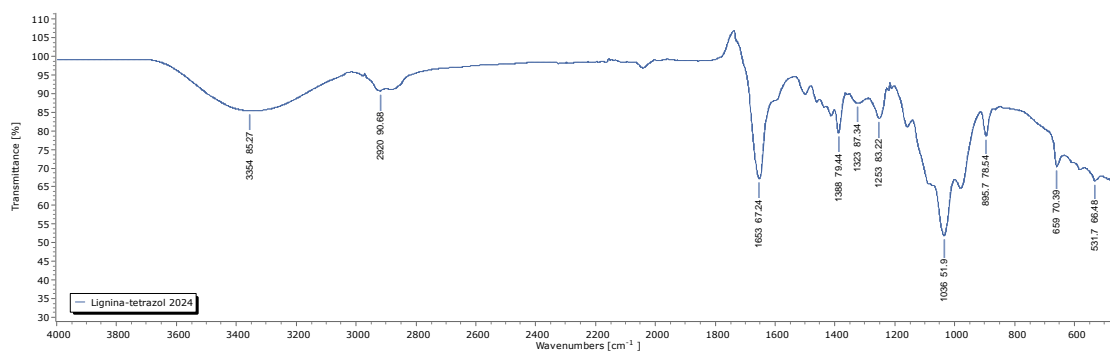


Imagen 6: Espectro de FTIR de lignina modificada con tetrazol.

En la Imagen 7 se muestran espectros FTIR de lignina extraída (azul) y de la lignina modificada con tetrazol (negro). Los cambios que se pueden resaltar son: una intensificación en la señal en  $2920\text{ cm}^{-1}$  que se debe a la vibración de estiramiento C-H del grupo metileno, el pico intenso ubicado en  $1653\text{ cm}^{-1}$ , así como la señal de  $1388\text{ cm}^{-1}$ ,  $1323\text{ cm}^{-1}$ ,  $1253\text{ cm}^{-1}$  que se atribuyen al C=N presente en el tetrazol.

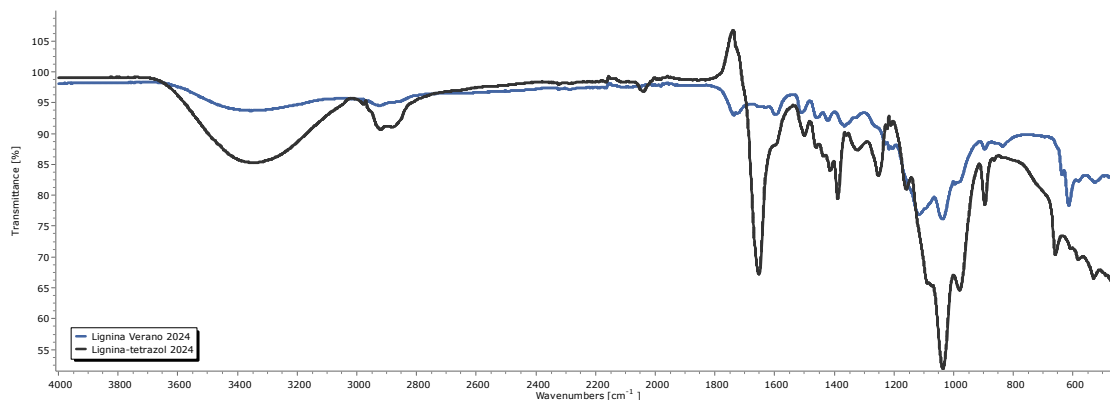


Imagen 7: espectros de FTIR de lignina (azul) y de tetrazol lignina (negro).

Con base en la caracterización cualitativa de FTIR y de la microscopía estereoscópica se puede establecer que se ha logrado la síntesis del núcleo del tetrazol unido a la lignina. Sin embargo, es necesario resaltar que se debe complementar la caracterización de la tetrazol-lignina empleando técnicas como la resonancia magnético nuclear de  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  así como estudios bidimensionales, además de la microscopía electrónica de barrido.

## Conclusiones

Las condiciones preliminares de reacción y la caracterización cualitativa permiten inferir que se ha logrado la síntesis del núcleo de tetrazol en la lignina. El compuesto tetrazol-lignina tiene potencial aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas contaminadas, con lo cual se posibilita la revalorización de la lignina como un residuo a un compuesto tetrazol-lignina de alto valor sintético y posiblemente económico. La estancia del Verano de la Ciencia y el desarrollo de este proyecto han contribuido en el fomento a la investigación y en la educación de estudiantes de nivel licenciatura.

## Perspectivas

Como perspectivas de este proyecto en una fase IV, se deberá hacer una serie de experimentos modificando las condiciones de reacción para lograr su optimización y así hacer eficiente la síntesis de la tetrazol-lignina. Posteriormente, se deberán realizar los estudios de adsorción de metales pesados tanto de la lignina como del terazol lignina, así como optimizar las condiciones para la adsorción-desorción eficientes.

## 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, responsable del Laboratorio de Ambiental II por las nutritivas discusiones y la infraestructura del laboratorio. Al Laboratorio de Evaluación Toxicológica y Riesgos Ambientales (LETRA) a cargo de Dr. Gustavo Cruz Jiménez de la DCNE por la espectrofotometría de infrarrojo. A la Dra. Norma Leticia Gutiérrez Ortega responsable del Laboratorio de Ambiental III por las facilidades otorgadas en la espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis). 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

- Abdelaziz, O. Y., & Hulteberg, C. P. (2017). Physicochemical Characterisation of Technical Lignins for Their Potential Valorisation. *Waste and Biomass Valorization*, 8(3), 859–869. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9643-9>
- Caicedo-Jiménez, N. J. (2023). *Bioconversión de Residuos Agrícolas por Micelio de Macrohongos Para la Elaboración de Prototipos de Bioproductos* [Universidad de Santander]. <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/9259>
- Chen, Y., Zhao, W., Zhao, H., Dang, J., Jin, R., & Chen, Q. (2020a). Efficient removal of Pb(II), Cd(II), Cu(II) and Ni(II) from aqueous solutions by tetrazole-bonded bagasse. *Chemical Physics*, 529. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.110550>
- Espinoza-Acosta, J. L., Montañón-Leyva, B., Valencia-Rivera, D. E., Ledesma-Osuna, A. I., & Vega-Ríos, A. (2022). Extracción, caracterización y actividad antioxidante de lignina de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y cáscara de nuez pecanera (*Carya illinoensis*). *Biotecnia*, 24(2), 94–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i2.1642>
- 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>
- Gómez 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. *Revista Forestal Latinoamericana*, 22(42), 51–64. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/29495>
- 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>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignin: composition, synthesis and evolution. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Rico Velazquez, J. P., Huerta Delgado, J. J., Meza Cano, C. E., Garcia Cerrito, L. E., Ramirez Lopez, J. S. de J., Aguilar de la Fuente, A., Villalobos Perez, S., & Cano Muñoz, P. A. (2023). *Lignin revalorization, Phase II: Compound Synthesis and Applications on Environmental Engineering*.
- 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>