

Revalorización de Lignina, Fase II: Síntesis de Compuestos y Aplicaciones en Ingeniería Civil

Lignin Revalorization, Phase II: Compound Synthesis and Applications on Civil Engineering.

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

^{1,2,3,4,5,6,7,8} Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato
le.garciacerrito@ugto.mx¹; pj.ricovelazquez@ugto.mx²; jsdj.ramirezlopez@ugto.mx³; ji.huerta.delgado@ugto.mx⁴; ce.mezacano@ugto.mx⁵; a.aquillardelafuente@ugto.mx⁶; pa.cano@ugto.mx⁷; s.villalobos@ugto.mx⁸.

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 bajío. La lignina tiene una potencial aplicación en la industria del pavimento asfáltico, para lo cual se propone un estudio teórico que tiene como objetivo evaluar la factibilidad del uso de lignina como aditivo en el asfalto para mejorar sus propiedades reológicas, así como disminuir su costo y la huella de carbono.

Palabras clave: lignina, asfalto, aditivo, ingeniería civil.

Introducción

La industria de la construcción y del transporte, emplea una amplia gama de productos a base de combustibles fósiles, especialmente en la elaboración de carreteras asfálticas, las cuales contienen una alta cantidad de productos derivados del petróleo. En este contexto, los pavimentos asfálticos representan más del 90% de la construcción a nivel global. En años recientes, la conservación y el uso eficiente de la energía junto con la reducción de emisiones ha tomado auge dentro de la ingeniería de pavimentos. Las emisiones que provoca el uso del asfalto convencional equivalen al 23% de todas las emisiones de efecto invernadero y el asfalto mezclado llega a generar emisiones de hasta un 15%. Por lo tanto, el sector de la industria carretera es responsable de emitir una cantidad significativa de gases contaminantes a la atmosfera. (Bizarro et al., 2021) Para comprender el por qué el asfalto genera un impacto ambiental dañino al planeta, se debe entender el proceso para su elaboración y cómo es su composición.



Figura 1: Elaboración de carpeta asfáltica. "US 2 Paving: Asphalt paver on Hewitt Avenue Trestle" by WSDOT is licensed under CC BY-NC-ND 2.0.

El asfalto es una mezcla compleja de color negro-café, compuesta de hidrocarburos de diferentes pesos moleculares y que también presenta otros derivados no metálicos. Es un líquido orgánico de alta viscosidad derivado del petróleo. (Yao et al., 2022a) Durante el proceso de producción, así como en su aplicación, se debe someter a un proceso de calentamiento a muy altas temperaturas, lo cual libera compuestos orgánicos volátiles (COV's) que contribuyen a la contaminación del aire, afectando al medio ambiente y al ser humano. Para tratar de disminuir el impacto ambiental y mejorar la sustentabilidad, es necesario implementar el uso de materiales reciclados o provenientes de residuos de biomasa en el sector carretero.

Actualmente existe una demanda en el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente. Esto ha estimulado que se desarrollen técnicas de pavimentación novedosas y sostenibles. Lo cual representa un paradigma para la industria del asfalto. Esta, se ha enfocado en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero derivada de la producción y aplicación de los asfaltos y sus mezclas derivadas, por lo que se están desarrollando alternativas que permitan disminución de costos y con menor impacto en el medio ambiente.

Existen reportes en la literatura que muestran la adición de diversos componentes al asfalto con el fin de modificar sus propiedades y disminuir costos, por ejemplo: (Uz & Gökalp, 2020) reportaron el uso de residuos de aceite de cocina, también se ha reportado la adición de residuos plásticos/polímeros (Rahi et al., 2019), residuos de neumáticos de caucho (Yu et al., 2020) e inclusive, mezclas de asfalto con residuos de colillas de cigarro. (Rahman et al., 2020) En este contexto, la biomasa se presenta como una alternativa que pueda reducir las emisiones contaminantes que produce el sector productor de asfalto. (Khandelwal, 2019)

Un ejemplo de biomasa es la lignina, la cual es uno de los polímeros más abundantes en nuestro planeta. La palabra lignina proviene del latín *lignum*, que significa madera. Este polímero se encuentra especialmente en las plantas y es el segundo polímero vegetal más abundante en la tierra después de la celulosa. Conforma una parte importante de la pared celular de las plantas, ya que permite que mantengan rigidez y dureza, por lo que hablando químicamente es un polímero fenólico reticulado. (Yao et al., 2022b, p. 1).

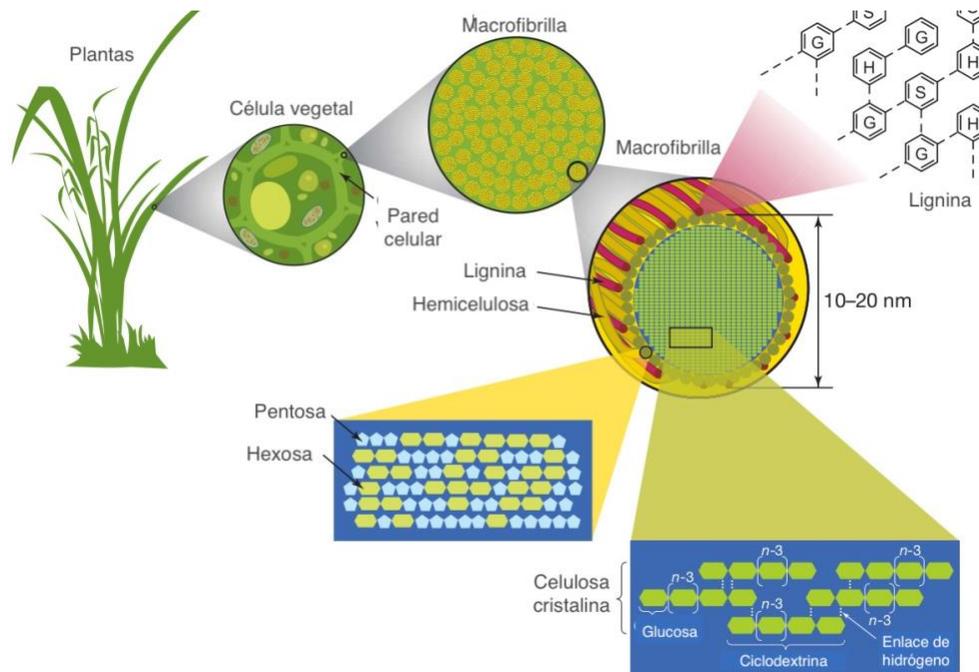
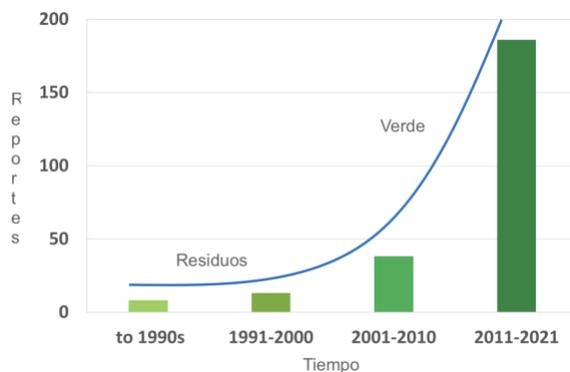


Figura 2. Biomasa y descripción de lignina. (Tomado de (Yao et al., 2022a, p. 2)

La lignina es un producto que se considera como renovable ya que es un biopolímero ampliamente disponible a gran escala. Este compuesto se encuentra presente en una amplia variedad de especies de plantas en partes como la corteza de madera y la pulpa, cáñamo, yute, algodón, lino, paja y maíz. Se estima que 50 millones de toneladas de lignina se producen en todo el mundo por año como subproductos de la industria de la pulpa y el papel, con un aumento esperado adicional. Sin embargo, solamente del 1% al 2% de la lignina es recuperada y empleada en aplicaciones de materiales. (Gellerstedt et al., 2012) La lignina tiene diversos usos, por ejemplo: en la industria cosmética, farmacéutica, química y particularmente, en la ingeniería civil. (Borges Gomes et al., 2020) En este sentido, el uso de la lignina como un sustituyente parcial o como aditivo del asfalto representa una alternativa ambiental y económicamente atractiva.

El uso de la lignina no es nuevo en la industria de carreteras y asfalto, pues existen reportes de su aplicación a principios de los años 90. Sin embargo, solo al comienzo del nuevo milenio, el tema retoma interés en la comunidad científica, involucrando principalmente químicos e ingenieros civiles con orientación en materiales de carreteras. En particular, en la última década se ha observado un aumento real en las publicaciones relacionadas a la aplicación de lignina en asfaltos. (Gráfica 1) Esto debido al concepto de biorrefinería, al cual la industria de papel y derivados de pulpa se han visto obligados a adherirse para diversificar su cartera de productos y así mantener su auge en nuevos tiempos. Al mismo tiempo, el sector de la construcción de carreteras necesita encontrar nuevas soluciones para superar la falta de asfalto, su constante aumento de costo y, sobre todo, encontrar una solución renovable válida y más amigable con el medio ambiente.



Gráfica 1: Publicaciones relacionadas a aplicaciones de lignina y asfalto (Tomado de Gaudenzi et al, 2023)

En esta última área, se ha presentado un creciente interés en las vías terrestres, específicamente en la ingeniería de pavimentos, debido a que la estructura química de la lignina es similar a la del asfalto y presentan afinidad en sus propiedades. (Yao et al., 2022, p. 6) En este sentido, es posible la reducción de emisiones de dióxido de carbono si se usa la lignina como aditivo en el asfalto. (Khandelwal, 2019)

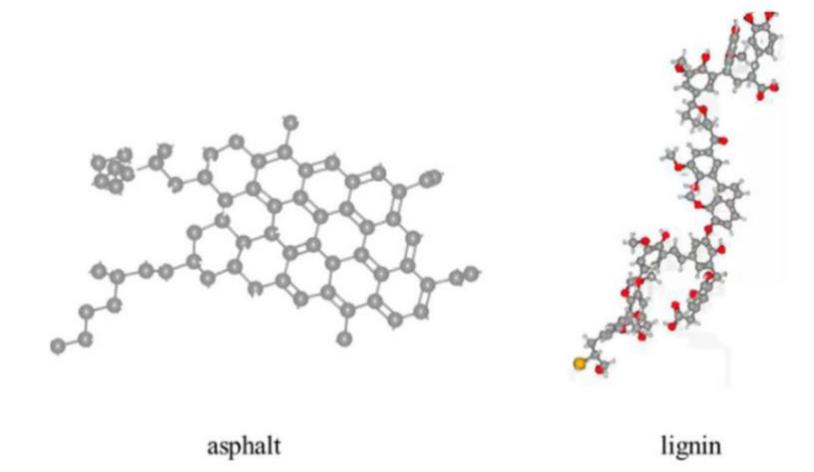


Figura 2: Modelo comparativo de la estructura química del asfalto y lignina. (Tomado de Yao et al., 2022a)

Actualmente, existen diversos tipos de aditivos usados en el asfalto, los tres más comunes son los orgánicos, químicos de tipo orgánico, químico y las técnicas de espumado. Sin embargo, la lignina en comparación con los aditivos mencionados anteriormente no solo ofrece un beneficio ecológico y renovable, también es capaz de proporcionar mejoras en viscosidad y dureza, con una mayor resistencia a altas y bajas temperaturas, aparte de que la lignina es más económica en comparación del asfalto convencional, proporcionando beneficios desde una perspectiva económica. (Yao et al., 2022c).

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 1.3x10⁶ toneladas de paja de maíz respecto de las 25.1x10⁶ toneladas generadas en México. (Serafín Muñoz et al., 2019)

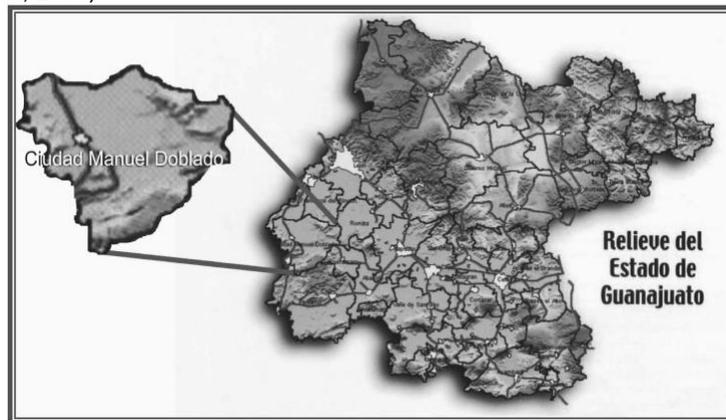


Figura 3: Ubicación geográfica del municipio de Manuel Doblado en el estado de Guanajuato. (tomado de CulturaGto.com, 2023)

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)

Resultados

A partir de la paja de maíz se extrajo la lignina bajo la metodología descrita obteniendo un rendimiento del 11.0 % lo cual concuerda con el reporte de Serafín-Muñoz en el 2019 para lignina extraída de paja de maíz proveniente del municipio de Manuel Doblado, Gto. Esta lignina extraída de la biomasa se caracterizó mediante dos técnicas: Espectroscopía de infrarrojo FTIR y por microscopía estereoscópica.

La microscopía estereoscópica se emplea usualmente en ciencia de materiales, pues los microscopios permiten visualizar las características de la superficie, irregularidades e inclusive defectos. La información

tridimensional y bidimensional que proporciona es relevante para analizar las propiedades de los materiales y así establecer si son idóneos para ciertas aplicaciones.

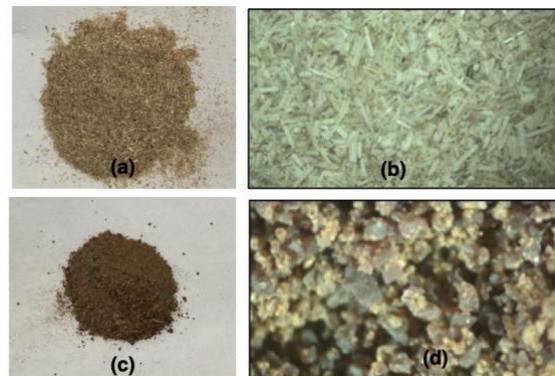


Figura 4: (a) Paja de maíz pulverizada, (b) Vista estereoscópica x2.0 de paja de maíz, (c) Lignina pulverizada y (d) Vista estereoscópica x2.0 de lignina. (elaboración propia)

En la Figura 4 se puede observar (a) paja de maíz pulverizada a 20 mallas, lo cual permite homogeneizar las partículas a tamaños no mayores de 0.841 mm. En la imagen (b) se observa la paja de maíz a 20 mallas con un aumento x2.0. En la imagen (c) se muestra la lignina pura extraída de la paja de maíz, la cual exhibe un característico color café, mientras que en la imagen (d) se muestra la lignina pura con un aumento x2.0 donde se observan partículas relativamente grandes con una superficie homogénea que además tiene pequeños agregados del mismo material.

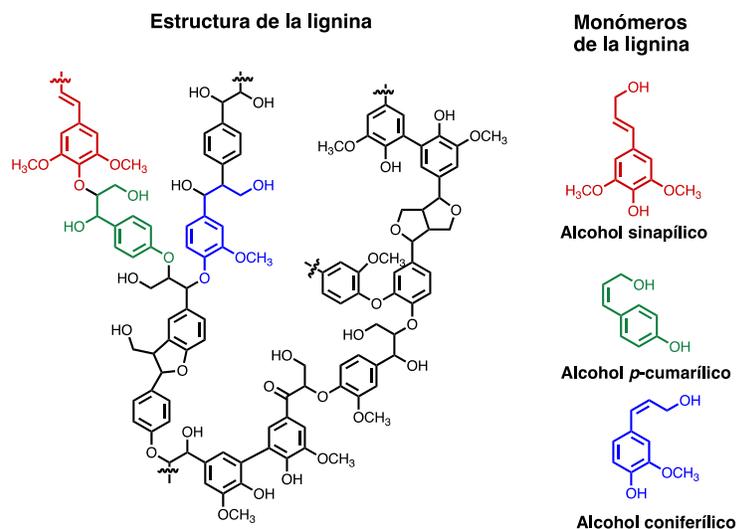


Figura 4: Estructura del biopolímero lignina y estructura de monómeros de lignina (Karunaratna & Smith, 2020)

La estructura molecular de la lignina es relativamente compleja al ser un biopolímero amorfo. Una de las técnicas más empleadas para caracterizar a los polímeros es la espectroscopía de infrarrojo. Con base en lo anterior, para complementar la caracterización de la lignina extraída de la biomasa, se sometió una muestra a la espectroscopía del infrarrojo. Esta técnica analítica se emplea en el estudio de la composición molecular de varios materiales, específicamente se analizan los grupos funcionales presentes.

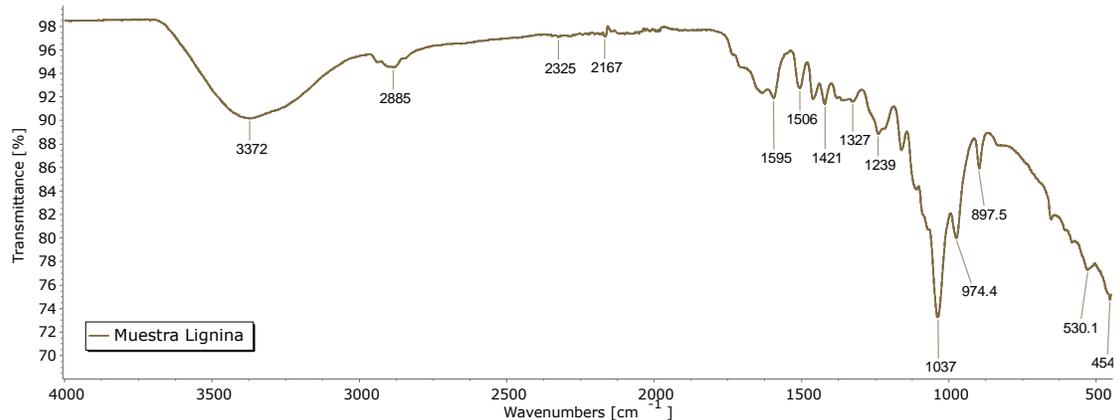


Figura 5: Espectro de infrarrojo (ATR) de lignina. (elaboración propia)

En la Figura 5 se observa el espectro de FTIR de lignina 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 C=C del anillo aromático ($1620, 1595$ y 1460 cm^{-1}).

Es relevante mencionar que los diversos espectros FTIR de lignina pueden variar dependiendo primordialmente del tipo de planta de la cual proviene la lignina, además influye el método de extracción y las condiciones del proceso.

Tabla 1: Señales FTIR de la lignina y enlaces correspondientes.

Número de onda (cm^{-1})	Transmitancia (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

En la Figura 5 se muestra la lignina después de un proceso de calentamiento a 150 °C, donde se muestra una apariencia similar a la mezcla asfáltica (b). En procesos siguientes se buscará realizar pruebas sobre una mezcla que permita determinar si ambas muestras son compatibles entre sí.

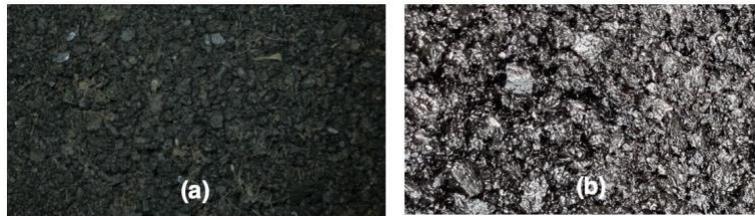


Figura 5: (a) Lignina expuesta a 150 °C, (b) Mezcla asfáltica (elaboración propia)

Propuesta de preparación de la mezcla lignina-asfalto

En este proyecto se propuso estimar la factibilidad teórico-práctica de una mezcla de asfalto con lignina como aditivo. Crear una mezcla con asfalto y lignina como aditivo implica mezclar cuidadosamente estos dos materiales para lograr las propiedades y el rendimiento deseados. El asfalto es un material altamente viscoso que se utiliza en la construcción de carreteras y la impermeabilización, mientras que la lignina es un polímero complejo que se encuentra en las paredes celulares de las plantas. Cuando se combina, la lignina puede actuar como un aditivo funcional para modificar ciertas propiedades del asfalto.



Figura 6: Tanques de almacenamiento de asfalto (tomado de VISE, planta León, Gto)

En principio se hará una selección del asfalto a usar más compatible con la lignina derivada del maíz: Debido a que el asfalto viene en varios grados y viscosidades. Posteriormente se preparará la lignina para la mezcla, esto implicará la purificación, el secado y la molienda de la lignina para obtener un polvo fino y uniforme. En el siguiente paso, se buscará determinar las proporciones de mezcla: La proporción óptima de la lignina como aditivo al asfalto dependerá de las propiedades deseadas de la mezcla final, buscando en todo momento que la mezcla ocurra de manera uniforme. Para el proceso de mezclado del asfalto y la lignina, dependerá de las cantidades involucradas, generalmente esto se puede hacer empleando agitación mecánica, procurando asegurar una mezcla completa y uniforme para lograr una mezcla homogénea. Se deberá tener un control de temperatura, pues el asfalto es muy sensible a las altas temperaturas y consecuentemente sus propiedades podrían cambiar significativamente, además de que la lignina tampoco se vea afectada por la temperatura. Finalmente, se deberán realizar pruebas de compatibilidad a nivel laboratorio: será fundamental realizar este tipo de pruebas para estudiar si la mezcla exhibe las propiedades deseadas y las mantiene a lo largo del tiempo. Estas pruebas podrían implicar la evaluación de las propiedades reológicas, el punto de reblandecimiento, la penetración y otras características relevantes del material mezclado.

La búsqueda en la literatura permite estimar la metodología siguiendo una ruta propuesta por Wu et al., 2021, p. 4. El resultado teórico es la siguiente metodología que será aplicada en la siguiente fase de este proyecto. La lignina derivada de la paja de maíz será secada a 105 °C durante 2 h en una estufa para eliminar la mayor cantidad de humedad. Posteriormente, la lignina se adicionará progresivamente hasta llegar a un 5 % *m/m* en una mezcladora en la cual, previamente, se calentará el asfalto a 160 °C – 168 °C para hacerlo un líquido con menor viscosidad. Los dos materiales (lignina y asfalto virgen) se mantendrán en agitación mecánica en

una mezcladora durante un tiempo de 45 minutos, manteniendo un rango de temperatura de 160 °C – 168 °C a 1200 rpm.



Tiempo: 45 min, Temperatura: 160-168 °C, Agitación: 1200 rpm

Figura 7: Propuesta de mezclado lignina-asfalto. (Elaboración propia)

Una vez terminado el tiempo de mezclado se procederá a analizar las propiedades siguientes:

- Propiedades físicas
- Trabajabilidad
- Resistencia al envejecimiento
- Propiedades reológicas
- Estabilidad al almacenamiento
- Estabilidad térmica

Estas pruebas ayudan a garantizar que el asfalto cumpla con los estándares requeridos y pueda soportar las tensiones que experimentará durante su vida útil. Estas son algunas de las pruebas más comunes realizadas en asfalto: Las propiedades físicas que tradicionalmente se evalúan en el asfalto son: penetración, punto de reblandecimiento y ductilidad, así como la medida de viscosidad y la trabajabilidad. Respecto de la estabilidad al almacenamiento, será determinada mediante una prueba de segregación, análisis de concentración además de examinar su morfología.



Figura 8: Propuesta de pruebas para la mezcla lignina- asfalto. (Wu et al., 2021b)

Agregar lignina como aditivo al asfalto, puede mejorar significativamente su resistencia al envejecimiento. La incorporación de lignina hace que el asfalto se vuelva más duro, indicado por la disminución de la penetración y ductilidad, y aumento del punto de reblandecimiento y módulo complejo. Se realizaron una serie de pruebas, como la prueba de viscosidad, la prueba de surcos, la prueba de fatiga y la prueba de agrietamiento, para

verificar el desempeño del asfalto modificado. Los resultados muestran que la adición de lignina ayuda a reducir la sensibilidad a la temperatura, aumentar la dureza, reducir la ductilidad, reducir el rendimiento de agrietamiento a baja temperatura y aumentar la viscosidad del asfalto base. Además, los resultados de las pruebas reológicas mostraron que la adición de lignina sódica mejoró significativamente la resistencia a la formación de surcos y las propiedades de fatiga en todas las dosis de adición. El asfalto modificado tiene una mejor resistencia a la deformación porque la lignina aumenta los componentes elásticos del asfalto y endurece el aglomerante asfáltico base. Agregar lignina al asfalto puede retrasar el envejecimiento del asfalto. (J. Yu et al., 2021)



Figura 9: Tambor mezclador Astec Double Barrel® (izquierda). Muestra de asfalto en suelo (derecha). (tomado de VISE planta León, Gto.

Dentro de las propiedades convencionales se encuentra la prueba de penetración: Esta mide la dureza del asfalto determinando la profundidad en décimas de milímetro a la que una aguja estándar penetra la muestra de asfalto bajo condiciones específicas. Es una prueba esencial para evaluar la consistencia del asfalto y se usa comúnmente para clasificar los grados de asfalto. (Caputo et al., 2020)

Prueba del punto de ablandamiento: Este análisis mide la temperatura a la cual la muestra de asfalto se vuelve lo suficientemente blanda como para permitir que una bola de acero caiga a través de ella una distancia específica. Esta prueba ayuda a determinar el rango de temperatura en el que el asfalto puede funcionar adecuadamente bajo carga. (Zahedi et al., 2020)

Prueba de ductilidad: Mide la distancia en centímetros a la que se puede estirar una pastilla o briqueta estándar de asfalto antes de romperse. Evalúa la capacidad del asfalto para deformarse bajo tensión de tracción y es esencial para determinar su idoneidad para la construcción de carreteras. (Ghabchi, 2022)

Prueba de punto de inflamación: El punto de inflamación es la temperatura más baja a la que los vapores de asfalto se encienden cuando se exponen a una llama abierta o chispa. Esta prueba es crucial para evaluar la seguridad del manejo y almacenamiento del asfalto.

Prueba de Marshall: Esta prueba se realiza en mezclas asfálticas para determinar su estabilidad y propiedades de flujo bajo cargas de tráfico simuladas. Ayuda a garantizar que la mezcla asfáltica funcione bien y resista la deformación bajo cargas de tráfico.

Prueba de relación de resistencia a la tracción (TSR): La prueba TSR se utiliza para evaluar la adherencia entre el asfalto y el agregado en una mezcla asfáltica. Ayuda a evaluar la fuerza de unión entre los dos componentes.

Prueba de formación de surcos (prueba de seguimiento de las ruedas): esta prueba evalúa la resistencia de una mezcla asfáltica a la formación de surcos bajo cargas repetidas de las ruedas. Es fundamental para evaluar la durabilidad y estabilidad de los pavimentos asfálticos.

Prueba de fatiga: La prueba de fatiga se realiza para determinar la resistencia de una mezcla asfáltica al agrietamiento bajo ciclos de carga repetidos. Ayuda a evaluar la vida de fatiga de los pavimentos de asfalto.



Figura 10: Reómetro de corte dinámico, Discovery, modelo HR10 (tomado de VISE, planta León Gto)

Además de las pruebas macroscópicas anteriormente descritas, será relevante complementar con un estudio teórico computacional que respalde la propuesta de Wu et al, del 2021.

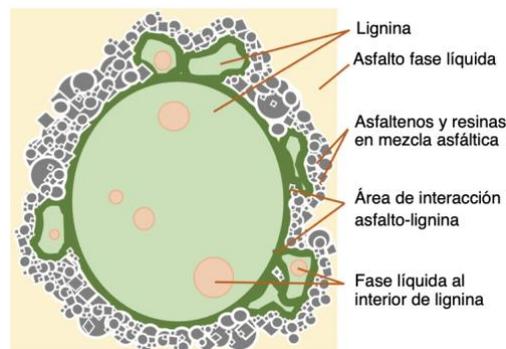


Figura 11: Propuesta de interacción en mezcla lignina-asfalto (tomado de Wu et al, 2021)

En la *Figura 10* se muestra una propuesta sobre la incorporación del aditivo lignina, lo cual da como resultado la absorción de la fase líquida del asfalto en el área de interacción (sólida) exterior de la lignina durante el proceso de mezclado. Esto formará el sistema de trabajo asfalto-lignina y que da como resultado un cambio en el comportamiento viscoelástico de los ligantes asfálticos. En este contexto, la lignina al ser un biopolímero podría exhibir propiedades similares a ligantes convencionales (fibras y caucho molido de neumáticos)

Conclusiones

En conclusión, si bien la lignina se muestra como una alternativa prometedora como un aditivo sostenible para mezclas asfálticas, su implementación práctica requiere de investigación exhaustiva, por parte de investigadores y empresas de la iniciativa privada. En particular, este trabajo genera un pequeño aporte a propuestas del campo de la tecnología del asfalto sostenible. La lignina tendrá un papel relevante en el impacto ambiental positivo en las mezclas con asfalto contribuyendo a desarrollar soluciones alternativas de infraestructura con un sentido ecológico y técnicamente viable en la ingeniería civil.

Perspectivas

Este estudio teórico sobre mezclas de lignina-asfalto, pretende desarrollar esta propuesta de experimentación en siguientes fases con el potencial de promover soluciones de infraestructura sostenible, reducir el impacto ambiental de la construcción de carreteras y contribuir al desarrollo de materiales de pavimento más resistentes y rentables. A medida que este proyecto de investigación multidisciplinario avance, la investigación desarrollada en la universidad podrá desempeñar un papel importante en la difusión de conocimientos, la colaboración con socios de la industria y el impulso de la adopción de tecnologías de asfalto basadas en lignina a una escala más amplia.

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

- Bizarro, D. E. G., Steinmann, Z., Nieuwenhuijse, I., Keijzer, E., & Hauck, M. (2021). Potential Carbon Footprint Reduction for Reclaimed Asphalt Pavement Innovations: LCA Methodology, Best Available Technology, and Near-Future Reduction Potential. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 1382, 13(3), 1382. <https://doi.org/10.3390/SU13031382>
- Borges Gomes, F. J., de Souza, R. E., Brito, E. O., & Costa Lelis, R. C. (2020). A review on lignin sources and uses. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 7(3), 100–105. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00222>
- Caputo, P., Abe, A. A., Loise, V., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., & Rossi, C. O. (2020). The Role of Additives in Warm Mix Asphalt Technology: An Insight into Their Mechanisms of Improving an Emerging Technology. *Nanomaterials*, 10. <https://doi.org/10.3390/nano10061202>
- 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.
- Gellerstedt, G., Tomani, P., Axegård, P., & Backlund, B. (2012). Lignin Recovery and Lignin-Based Products. En *Integrated Forest Biorefineries* (pp. 180–210). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849735063-00180>
- Ghabchi, R. (2022). Effect of Lignin Type as an Additive on Rheology and Adhesion Properties of Asphalt Binder. *Solids*, 3(4), 603–619. <https://doi.org/10.3390/solids3040038>
- González, A. M., Herrera, J. P., & Rodríguez, A. M. (2007). *CARACTERIZACIÓN DE FRACCIONES DE LIGNINA EXTRAÍDAS DEL LICOR NEGRO CON SOLVENTES ORGÁNICOS*.

- Karunaratna, M. S., & Smith, R. C. (2020). Valorization of lignin as a sustainable component of structural materials and composites: Advances from 2011 to 2019. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Número 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12020734>
- Khandelwal, M. (2019). *Carbon footprint of Lignin modified Asphalt mix*.
- Khandelwal M. (2019). *Carbon footprint of Lignin modified Asphalt mix*.
- Rahi, D. C., Chandak, R., & Vishwakarma, A. (2019). Utilization of liquid plastic waste in bitumen for construction of roads. *AIP Conference Proceedings*, 2158(1), 12. <https://doi.org/10.1063/1.5127134/899283>
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Possible Recycling of Cigarette Butts as Fiber Modifier in Bitumen for Asphalt Concrete. *Materials 2020*, Vol. 13, Page 734, 13(3), 734. <https://doi.org/10.3390/MA13030734>
- 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>
- Uz, V. E., & Gökalp, İ. (2020). Sustainable recovery of waste vegetable cooking oil and aged bitumen: Optimized modification for short and long term aging cases. *Waste Management*, 110, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.05.012>
- Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W., & Han, W. (2021a). Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124663>
- Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W., & Han, W. (2021b). Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124663>
- Yao, H., Wang, Y., Liu, J., Xu, M., Ma, P., Ji, J., & You, Z. (2022a). Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey. En *Frontiers in Materials* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524>
- Yao, H., Wang, Y., Liu, J., Xu, M., Ma, P., Ji, J., & You, Z. (2022b). Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey. En *Frontiers in Materials* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524>
- Yao, H., Wang, Y., Liu, J., Xu, M., Ma, P., Ji, J., & You, Z. (2022c). Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524>
- Yu, H., Zhu, Z., Leng, Z., Wu, C., Zhang, Z., Wang, D., & Oeser, M. (2020). Effect of mixing sequence on asphalt mixtures containing waste tire rubber and warm mix surfactants. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119008. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119008>
- Yu, J., Vaidya, M., Su, G., Adhikari, S., Korolev, E., & Shekhovtsova, S. (2021). Experimental study of soda lignin powder as an asphalt modifier for a sustainable pavement material. *Construction and Building Materials*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123884>
- Zahedi, M., Zarei, A., & Zarei, M. (2020). The effect of lignin on mechanical and dynamical properties of asphalt mixtures. *SN Applied Sciences*, 2(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3041-4>