



**Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo**



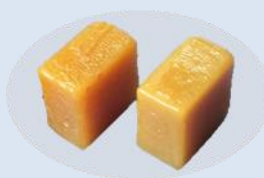
**División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Química**

Tesis Doctoral

Material Compuesto a Base de Colofonia con Biosílice de la Cáscara de Arroz: Obtención y Caracterización

Presenta: Erica Arreola García

Para obtener el grado de: Doctora en Ciencias en Ingeniería Química



Asesores:

Dr. Salomón R. Vásquez García

Dra. Nelly Flores Ramírez

Sinodales:

Dr. Javier Lara Romero

Dr. Joel Vargas Ortega

Dr. Marco A. Martínez Cinco

Morelia, Michoacán, Abril 2026



Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo



Asunto: Impresión de Tesis.

M.P.P. Venecia Azorero Medina Ortiz.
Jefe del Departamento de Titulación de la
U.M.S.N.H.

Por este medio nos dirigimos a usted de la manera más atenta para notificarle, que después de haberle dado seguimiento al desarrollo de la tesis: "MATERIAL COMPUESTO A BASE DE COLOFONIA CON BIOSÍLICE DE LA CÁSCARA DE ARROZ: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN" después de haber revisado el manuscrito que presentó la alumna **Erica Arreola García**, con matrícula **1051569K**, concluimos que cumple con los requisitos académicos y con lo establecido en el Reglamento General de Estudios de Posgrado para el desarrollo de su Tesis.

Por lo anterior este Comité Tutoral da el aval para su impresión final.

Director de Tesis: Dr. Salomón Ramiro Vázquez García 02001420

Codirector: Dra. Nelly Flores Ramírez 07000120

Vocales:

Dr. Javier Lara Romero 02000245

Dr. Joel Vargas Ortega 18010038

Dr. Marco Antonio Martínez Cinco 02001403

Atentamente,
Morelia, Michoacán a 23 de marzo de 2026.

Dr. Javier Lara Romero
Coordinador del Programa de Doctorado en Ciencias en
Ingeniería Química.

JLR/mcpa.



A Lupita y Raúl,
Mis pilares fundamentales.

*“El poder creativo de la naturaleza está más allá
del instinto de destrucción del hombre”*



*“El viaje más maravilloso no es al centro de la tierra o
a los confines del universo sino al fondo de uno mismo”*

Julio Verne

Agradecimientos

Gracias a los doctores Nelly Flores y Salomón Vásquez, mis asesores de tesis, por su valiosísimo apoyo, por su gran comprensión y paciencia, y por todo lo que me han aportado durante mi formación.

A los doctores Joel Vargas, Marco Martínez y Javier Lara, mis sinodales, por sus valiosas revisiones y consejos.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada, que me permitió dedicarme completamente a la realización de este proyecto de investigación.

A la División de Estudios de Posgrado de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por brindarme el espacio e infraestructura donde se desarrolló este trabajo.

Doy gracias a mis amigos y compañeros de laboratorio, por su amistad y por todo lo que me han inspirado y aportado a lo largo de estos años de doctorado.

Agradezco a mis padres, a mi esposo y a toda mi familia por su apoyo incondicional en mi formación profesional y en mi vida, por su confianza constante en mí y su cariño.

Material compuesto a base de colofonia con biosílice de la cáscara de arroz: obtención y caracterización

Presenta: M.C. Erica Arreola García

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigido por: D.C. Salomón Ramiro Vásquez García y D.C. Nelly Flores Ramírez 2026

RESUMEN

Los plásticos de origen natural pueden reducir el alto empleo de los hidrocarburos y la contaminación ambiental. La colofonia es abundante y de bajo costo; se obtiene de la destilación de la oleorresina obtenida de árboles de pino; sin embargo, dada su fragilidad, su aplicación para el embalaje es limitada. Además, un refuerzo natural en materiales compuestos es la biosílice, la cual representa un 20 % en peso de la cáscara de arroz. Por lo anterior, esta investigación reporta el desarrollo de un material compuesto, preparado a partir de colofonia y biosílice, mediante mezcla y vaciado. Se investigaron sus propiedades físico-mecánicas: absorción de agua, ángulo de contacto, resistencia a la flama y dureza. La asociación se evaluó mediante MEB, FTIR y TGA, variando la concentración de biosílice en el rango de 5 a 20 % en peso. La absorción de agua es menor al 1 %, y el ángulo de contacto disminuyó de 58 a 54.3° para CB0 y CB20. La velocidad de combustión se redujo de 56 a 32 mm/s en CB0 y CB20, respectivamente. Se observa un aumento del 1.5 % en la dureza de CB20 respecto a CB0. Los resultados de MEB muestran una alta dispersión de SiO₂ en la matriz de colofonia, incluso a altas concentraciones de biosílice. Por FTIR, se identificó la interacción entre el grupo carboxilo (COOH) y la fracción -O-Si, formando silanol (Si-OH) a 3440 cm⁻¹. El TGA registra una diferencia en la tasa de pérdida de peso de 9 %/min en la temperatura de pérdida máxima de peso entre CB0 y CB20. Lo anterior nos permite proponer una ruta verde y factible para preparar materiales compuestos de base biológica, que puedan emplearse como plásticos de embalaje, reduciendo la dependencia de los materiales sintéticos y el impacto ambiental.

Palabras clave: Resina de pino, Biosílice, Compósito, Retardante de llama, Biomateriales.

Rosin-based composite material with rice husk biosilica: production and characterization

Presented by: Erica Arreola Garcia MS

PhD in Chemical Engineering

Directed by: Salomon R. Vasquez Garcia Ph. D. and Nelly Flores Ramirez Ph. D. 2026

ABSTRACT

Plastics of natural origin can reduce the high use of hydrocarbons and environmental pollution. Rosin is abundant and inexpensive; it is obtained from the distillation of oleoresin from pine trees; however, given its fragility, its application for packaging is limited. Furthermore, biosilica, which represents 20% by weight of rice husks, is a natural reinforcement in composite materials. Therefore, this research reports the development of a composite material prepared from rosin and biosilica through mixing and casting. The physical and mechanical properties of the biosilica were investigated: water absorption, contact angle, flame resistance, and hardness. The biosilica mixture was evaluated using SEM, FTIR, and TGA, with the biosilica concentration ranging from 5 to 20% by weight. Water absorption was less than 1%, and the contact angle decreased from 58° to 54.3° for CB0 and CB20. The combustion rate was reduced from 56 mm/s to 32 mm/s for CB0 and CB20, respectively. A 1.5% increase in hardness was observed in CB20 compared to CB0. SEM results show a high dispersion of SiO₂ in the rosin matrix, even at high biosilica concentrations. FTIR identified the interaction between the carboxyl group (COOH) and the -O-Si fraction, forming silanol (Si-OH) at 3440 cm⁻¹. TGA recorded a difference in the weight loss rate of 9%/min at the maximum weight loss temperature between CB0 and CB20. The above allows us to propose a green and feasible route to prepare bio-based composite materials that can be used as packaging plastics, reducing dependence on synthetic materials and environmental impact.

CONTENIDO

RESUMEN	7
CONTENIDO	9
I. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Objetivos	16
1.2 Hipótesis.....	17
1.3 Justificación de la Investigación	17
1.4 Antecedentes	18
II. MARCO TEÓRICO	21
2.1 Material Compuesto	21
2.1.1 Clasificación de los materiales compuestos	21
2.1.2 Componentes de un material compuesto	22
2.2 Matriz de un material compuesto	23
2.2.1 Matriz polimérica	23
2.3 Biocompuestos	26
2.4 Resinas naturales	27
2.4.1 Resina de pino	28
2.5 Colofonia.....	31
2.6 Obtención de colofonia de miera	34
2.6.1 Resinación	34
2.6.2 Destilación	36
2.7 Modificaciones de la colofonia	37
2.8 Refuerzos en materiales compuestos.....	38
2.8.1 Refuerzos con partículas.....	38
2.8.2 Cáscara de arroz (CA)	39
2.8.3 Sílice de cáscara de arroz.....	40
III. METODOLOGÍA	42
3.1 Reactivos, Materiales y Productos	43
3.1.1 Reactivos	43
3.1.2 Obtención de biosílice a partir de cáscara de arroz	44

3.1.3 Hidroxilación de la biosílice.....	45
3.1.4 Obtención de colofonia e hidroxilación.....	45
a) Síntesis de ácido abiético epoxidado e isómeros	46
b) Síntesis de ácido hidroxabiético e isómeros	46
3.1.5 Elaboración de los materiales compuestos	47
a) Colofonia-Biosílice (CB).....	48
b) Colofonia hidroxilada-Biosílice (ChxB)	48
c) Colofonia-Biosílice hidroxilada (CBhx).....	49
d) Colofonia hidroxilada-Biosílice hidroxilada (ChxBhx)	49
3.2 Mediciones y Caracterizaciones.....	50
3.2.1 Porcentaje de biosílice de cáscara de arroz	50
3.2.2 Mediciones físicas y mecánicas.....	50
a) Densidad	50
b) Absorción de agua	51
c) Ángulo de contacto	51
d) Resistencia a la flama Prueba UL-94	52
e) Dureza Shore A.....	52
3.2.3 Análisis estadístico	52
3.2.4 Determinación de la asociación mediante técnicas instrumentales	53
a) Caracterización por MEB	53
b) Caracterización por FTIR	53
c) Caracterización por TGA.....	54
d) Caracterización por DRX	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
4.1 Obtención de biosílice a partir de la cáscara de arroz	56
4.2 Caracterización de biosílice y de cáscara de arroz.....	56
4.2.1 Análisis visual de cáscara de arroz y su biosílice	56
4.2.2 MEB de la biosílice	57
4.2.3 FTIR de cáscara de arroz y su biosílice	58
4.2.4 DRX de la cáscara de arroz y su biosílice	59
4.3 Obtención de colofonia hidroxilada	59

4.4 Caracterización de los materiales compuestos	60
4.4.1 Análisis visual de los materiales compuestos	60
a) Colofonia-Biosílice	61
b) Colofonia hidroxilada-Biosílice	61
c) Colofonia-Biosílice hidroxilada	62
4.4.2 Densidad de los materiales compuestos	62
a) Densidad de Colofonia-Biosílice	62
b) Densidad de Colofonia hidroxilada-Biosílice	63
c) Densidad de Colofonia-Biosílice hidroxilada	64
4.4.3 Absorción de agua de los materiales compuestos	65
a) Absorción de agua de Colofonia-Biosílice	65
b) Absorción de agua de Colofonia hidroxilada-Biosílice	65
c) Absorción de agua de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada	66
d) Análisis estadístico de la absorción de agua en los materiales compuestos	67
4.4.4 Ángulo de contacto de los materiales compuestos	68
a) Ángulo de contacto de los materiales Colofonia-Biosílice	69
b) Ángulo de contacto de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada	69
c) Análisis estadístico del ángulo de contacto en los materiales compuestos	70
4.4.5 Resistencia a la flama de los materiales Colofonia-Biosílice	71
a) Rendimiento de la inflamabilidad de CB	71
b) Análisis estadístico del tiempo de quemado de Colofonia-Biosílice	72
c) Análisis estadístico de la velocidad de quemado de Colofonia-Biosílice	73
4.4.6 Dureza Shore A de los materiales compuestos	74
a) Dureza shore de los materiales Colofonia-Biosílice	74
b) Dureza shore de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice	75
c) Dureza shore de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada	75
d) Análisis estadístico de la dureza de los materiales compuestos	76
4.4.7 Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de los compósitos	77
4.4.8 MEB y EDS de los materiales compuestos	78
a) MEB de los materiales Colofonia-Biosílice	78
b) MEB de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice	80

c) MEB de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada	81
4.4.9 FTIR de la asociación de los materiales compuestos	82
a) FTIR de los materiales Colofonia-Biosílice.	82
b) FTIR de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice	83
c) FTIR de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada	84
d) FTIR de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice hidroxilada.....	85
4.5 TGA y DTG de la asociación de los materiales Colofonia-Biosílice.....	86
V. CONCLUSIONES	89
VI. ALCANCES	91
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA	102
VIII. ANEXOS: PUBLICACIONES Y CONGRESO	104

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un grave problema ambiental, derivado de grandes volúmenes de residuos plásticos y materiales compuestos fabricados con polímeros convencionales que son incapaces de biodegradarse (Oslet et al., 2020; Buteler, 2019). Esto ha generado un mayor interés en el desarrollo de biocompuestos a partir de recursos naturales renovables que exhiben características ecológicas y de biodegradabilidad (Wilbon et al., 2013; Goffin et al., 2011). La creciente concientización sobre el cambio climático y la promulgación de leyes más estrictas en los últimos años, han generado una investigación continua en la preparación de nuevos materiales a partir de plantas y sus derivados debido a su gran potencial como alternativa a los materiales convencionales (Ashori, 2008).

La colofonia ha recibido gran atención debido a su origen bilógico, alta disponibilidad y biodegradabilidad, que ofrecen importantes beneficios económicos. La colofonia es una resina natural que se obtiene de la destilación de la oleorresina obtenida de árboles de coníferas del género *Pinus* (Zheng et al., 2010). Es un sólido rígido y quebradizo compuesto principalmente de ácidos resínicos de tipo abiético y pimárico (Aldas et al., 2021). La estructura de los ácidos resínicos tiene dobles enlaces conjugados y un grupo carboxílico, que permiten su modificación química (Yao & Tang, 2013). Tiene aplicaciones en bioplásticos, biomédica y también se ha investigado como un posible material de ingeniería (Moustafa et al., 2022; Jia et al., 2019; Miao et al., 2017; Narayanan et al., 2017). Sin embargo, en su estado natural es frágil para resistir al impacto y esto limita su aplicación para embalaje.

La cáscara de arroz es un residuo agrícola abundante. Es la cubierta que protege al grano de arroz durante su crecimiento. En condiciones de combustión controlada, la materia orgánica de la cáscara de arroz que consiste en celulosa y lignina se elimina, mientras se produce 20% de sílice amorfa o biosílice, con un tamaño de partícula muy fino y alta pureza (Wang et al., 2012; Adam et al., 2011). Esta biosílice se ha empleado como agente de refuerzo en polímeros naturales y biocompuestos dando excelentes resultados (Susanto, 2019; Karthikeyan et al., 2019; Moustafa et al., 2022).

Una forma de fortalecer resinas naturales es mezclarlas con otros materiales y se han realizado numerosas investigaciones sobre la modificación de colofonia con diversos materiales. Por ejemplo, Lam et al. (2012) demostraron que se pueden preparar compósitos colofonia-fibras de henequén con propiedades mecánicas mejoradas. Wang et al. (2011) establecieron el carácter hidrófobo de los compuestos de colofonia-lignina y más tarde Zhu et al. (2021) presentaron el material colofonia-polvo de bambú con la propiedad de termoplasticidad. Sin embargo, aunque el efecto positivo de estos materiales sobre las propiedades de colofonia se demostró hace varios años, se ha prestado poca atención a la interacción entre colofonia-biosílice y su influencia en propiedades térmicas, mecánicas, hidrofobicidad, entre otras.

En esta investigación se presenta una serie de criterios para evaluar la influencia de las partículas de SiO_2 en las propiedades de colofonia. Sobre la base de estos criterios, se describe la preparación de un conjunto de mezclas utilizando colofonia natural y colofonia hidroxilada con partículas de SiO_2 de cáscara de arroz. Esta combinación de dos materiales físicamente distintos formó un nuevo compuesto en el que la incorporación de biosílice aumentó significativamente la resistencia térmica de la colofonia, mejoró su dureza, al mismo tiempo que conservó su carácter hidrófobo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Desarrollar un material compuesto a partir de colofonia como matriz con biosílice de cáscara de arroz como refuerzo y determinar sus propiedades mecánicas, físicas y térmicas.

1.1.2. Objetivos Particulares

1. Obtener biosílice a partir de la cáscara de arroz, determinar su pureza y composición química para su empleo como refuerzo.

2. Hidroxilar la colofonia a través de una reacción ácida, determinar sus características fisicoquímicas y grupos funcionales para su empleo como matriz.

3. Elaborar los materiales compuestos a partir de colofonia-biosílice, colofonia hidroxilada-biosílice, empleando una relación de 0, 5, 10, 15 y 20 por ciento en peso de biosílice respecto a la colofonia.

4. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos mediante ensayos de absorción de agua, ángulo de contacto, resistencia a la flama y dureza shore.

5. Determinar la asociación en los materiales compuestos, mediante MEB, FTIR y TGA.

1.2. Hipótesis

La colofonia es un material con moléculas que poseen un grupo carboxilo (-COOH), mientras la biosílice que es dura y con resistencia a la flama, presenta grupos siloxano (Si-O-Si); basado en lo anterior, se plantea que: *se generará un compuesto colofonia-biosílice formando enlaces silanol (Si-OH) y silicio-oxígeno (O-Si-O) entre la colofonia y la biosílice, donde al incrementar la proporción de biosílice se incrementará la resistencia mecánica y a la flama del material compuesto a evaluarse.*

1.3. Justificación de la Investigación

En la actualidad existe la conciencia del importante problema ambiental derivado de los grandes volúmenes, falta de reúso y de reciclado de los plásticos no biodegradables. Así, se entiende el compromiso de producir plásticos amigables con el medio ambiente, evitando aquellos que tardan una media de 500 años en degradarse. Por lo tanto un bioplástico a base de colofonia (matriz polimérica) y biosílice de la cáscara de arroz (refuerzo) aporta en el sentido ecológico y a su vez puede mejorar las condiciones económicas de vida en aquellas comunidades que dependen directamente de la recolección y sembrado de estos dos productos básicos, al incrementar el valor añadido de la colofonia y de la cáscara de arroz.

1.4. Antecedentes

En los últimos años ha habido una creciente demanda por el uso de plásticos, lo que ha generado graves problemas de contaminación por la acumulación y el tratamiento inadecuado de grandes volúmenes de residuos de materiales plásticos. Lo que conduce al desarrollo de materiales renovables, reciclables, biodegradables y sostenibles (Faruk et al., 2012). Esto se puede lograr a partir de polímeros de origen natural como sustitutos de los plásticos tradicionales.

La colofonia es un material renovable proveniente de una resina natural que se obtiene a partir de la exudación de árboles de coníferas del género *Pinus* (Roy et al., 1990). Es uno de los materiales de base biológica más baratos y abundantes que puede usarse para reemplazar los polímeros basados en materia prima petroquímica. Es importante mencionar que Michoacán es el principal estado productor de resina de pino en México.

Wang et al. (2011) presentaron los compuestos de colofonia-lignina preparados mediante polimerización por radicales de transferencia atómica. La colofonia transmitió hidrofobicidad a la lignina, proporcionando una excelente resistencia al agua de esta clase de polímeros renovables.

Lam et al. (2012) reportaron las propiedades mecánicas de un material compuesto a base de colofonia como matriz polimérica y fibras de henequén como refuerzo, variando el porcentaje de refuerzo. Los materiales compuestos presentan una menor resistencia a la tensión y módulo de elasticidad a mayor contenido de fibra, ya que al aumentar el porcentaje de fibras disminuye su infiltración en la colofonia.

Wu et al. (2016) investigaron los híbridos a base de colofonia y nanosílice modificada obtenidos por un método de curado ultravioleta in situ. Los resultados mostraron que la nanosílice modificada se dispersó homogéneamente en la matriz de colofonia de ácido acrílico. En esta combinación la transición vítrea y la temperatura termogravimétrica de los recubrimientos híbridos se incrementaron, también la dureza y la resistencia química mejoraron.

Patel & Rawat, (2017) fabricaron e investigaron las propiedades del compuesto harina de madera de teca-poliéster-colofonia, encontró una excelente resistencia al impacto, alta resistencia al desgaste por abrasión y alta ductilidad para este material compuesto.

Zhu et al. (2021) elaboraron el material colofonia-polvo de bambú mediante una reacción de esterificación en condiciones heterogéneas, obteniendo la termoplasticidad deseada para estos materiales de base biológica.

Al integrar partículas inorgánicas obtenidas de fuentes naturales como materiales de refuerzo en matrices de polímeros naturales, es posible fabricar materiales verdes, con beneficios ambientales positivos con respecto a disponibilidad y mejor aprovechamiento de las materias primas. Entre varios desechos agrícolas, la cáscara de arroz es una fuente natural de sílice, un material prometedor como relleno natural en compuestos de polímeros naturales. Recientemente, varias industrias importantes, como la automotriz, de construcción y embalaje, han mostrado un gran interés en el desarrollo de nuevos materiales compuestos reforzados con materiales de origen natural (Kumar et al., 2019).

Las partículas de sílice se han empleado como agente de refuerzo en varios materiales compuestos con éxito, por ejemplo, Yang et al. (2021) reportaron la mejora del rendimiento del caucho de silicona vulcanizado a temperatura ambiente a base de colofonia utilizando sílice pirógena como nanorrelleno. Se indicó que las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica del caucho de silicona se pueden mejorar de manera efectiva mediante el efecto sinérgico de colofonia y SiO_2 .

Moustafa et al. (2022) reportaron que los biocompuestos poliuretano-quitina-colofonia reforzados con nanopartículas de SiO_2 mejoraron sus propiedades mecánicas, térmicas, así como su actividad antimicrobiana, siendo un material prometedor para aplicaciones de envasados de alimentos.

Wang et al. (2022) sintetizaron un retardante de llama respetuoso con el medio ambiente a partir de colofonia-Si-P para mejorar la seguridad contra incendios de la espuma de poliuretano.

La tasa máxima de liberación de calor disminuyó un 50% tras la modificación, la generación de carbón rico en sílice reduce significativamente la emisión total de humo, además de la mejora en la resistencia a la compresión.

Por lo anterior, en el presente proyecto se pretende desarrollar un material compuesto biodegradable a partir de colofonia como matriz polimérica y partículas de biosílice de la cáscara de arroz como material de refuerzo, así mismo, serán evaluadas las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del compuesto.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Material Compuesto

Los materiales compuestos, son uniones macroscópicas de dos o más materiales distintos denominados componentes, diferenciados en su función, forma o composición cuya finalidad es la de formar un tercer material con propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Son heterogéneos, es decir sus propiedades varían en todo su volumen, donde de manera independiente cada componente aporta sus mejores características al compuesto, encontrando incluso características que ninguno de los constituyentes posee, como valores poco usuales de: resistencia mecánica, rigidez, resistencia a la corrosión, peso ligero, aislantes térmicos y eléctricos entre otros (Mazón, 2017).

2.1.1 Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos se clasifican considerando el tipo de matriz y de refuerzo.

De acuerdo con el tipo de matriz pueden ser:

- Matriz metálica
- Matriz cerámica
- Matriz polimérica

De acuerdo con el tipo de refuerzo pueden ser partículas o fibras, como se muestra en la Figura 1.

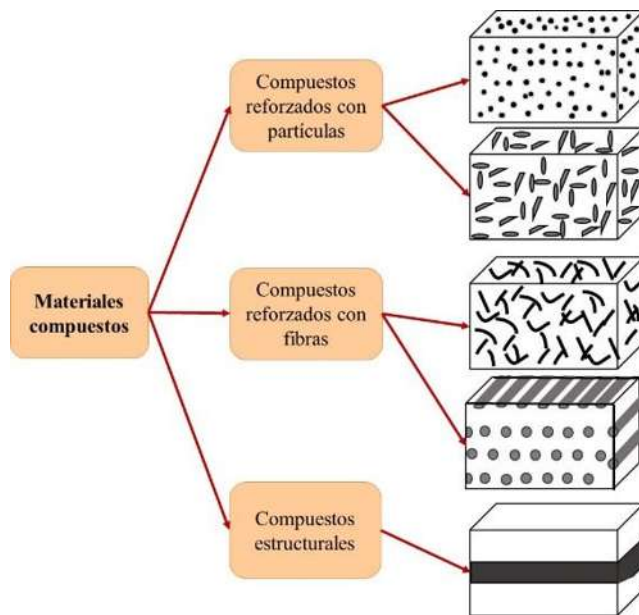


Figura 1. Clasificación de materiales compuestos según el tipo de refuerzo.

2.1.2 Componentes de un material compuesto

Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poder identificarse por medios físicos, ya que son heterogéneos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos muchas veces hace que también sean anisotrópicos, haciendo que sus propiedades no sean las mismas en todo su volumen.

Los componentes que conforman un material compuesto son la matriz y el refuerzo y a la capa de unión entre ellos se denomina interfaz, existiendo la posibilidad de adicionar agentes de acoplamiento y revestimientos con el propósito de mejorar la capa de la interfaz del material compuesto y de esta forma mejorar las propiedades del material (Mazón, 2017).

En la Figura 2, se muestran los componentes de un material compuesto.

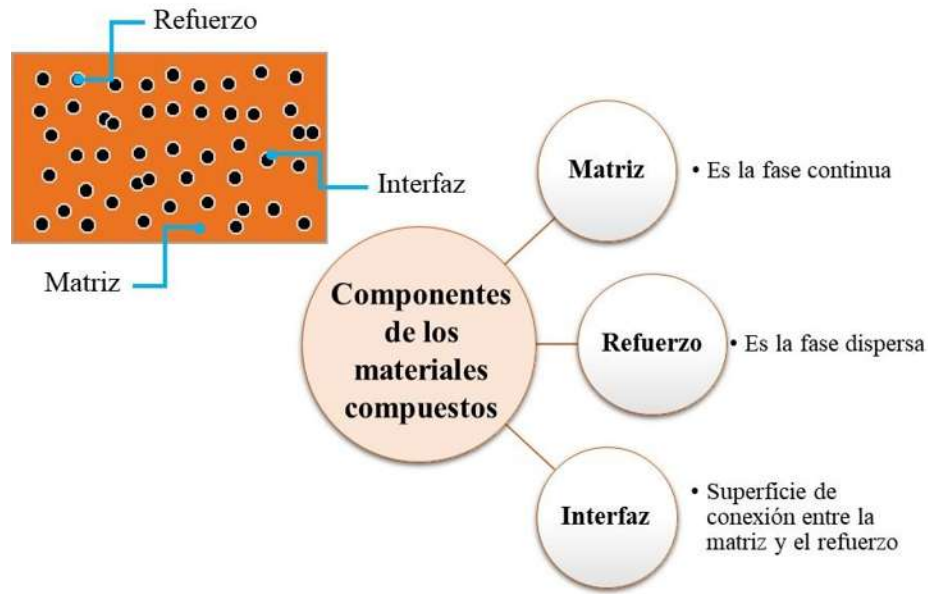


Figura 2. Componentes de un material compuesto.

2.2 Matriz de un material compuesto

La matriz en un material compuesto cumple diversas funciones; protege de la abrasión mecánica y da soporte al material de refuerzo, proporciona la consistencia y da continuidad al material, aglutina y sostiene a los elementos de refuerzo, transfiere cargas aplicadas sobre la matriz hacia los refuerzos, provee al material compuesto de una barrera contra factores ambientales como la humedad, la radiación solar, el agua, la temperatura, el viento, los agentes biológicos y químicos.

Existen tres tipos de matriz: metálica, cerámica y polimérica. Las propiedades del material compuesto dependerán en gran medida del tipo de matriz que se utilice. El presente trabajo se centra en el estudio de materiales compuestos con matrices poliméricas.

2.2.1 Matriz polimérica

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión química de moléculas más pequeñas conocidas como monómeros. Cuando un polímero está conformado por un solo tipo de monómero, se conoce como homopolímero y si tiene dos o más unidades monoméricas, se conoce como copolímero (Hill, 2005).

Los polímeros se clasifican como: polímeros naturales y polímeros sintéticos (Hill, 2005).

Los polímeros naturales son los que provienen de la naturaleza y se pueden extraer, dentro de este grupo se encuentran los polisacáridos (almidón, celulosa, glucógeno, pectina, gomas vegetales), polipéptidos (seda, colágeno, caseína, albúmina, queratina), hidrocarburos (caucho, gutapercha o poliisopreno) (Thakur et al., 2022; Gad, 2014). Mientras que los polímeros sintéticos se obtienen mediante procesos o reacciones químicas y se dividen en polímeros termoestables y termoplásticos (Thakur et al., 2022).

Los polímeros sintéticos son empleados en matrices de materiales compuesto para diversas aplicaciones y en grandes cantidades debido a sus propiedades como su baja densidad, ligereza, resistencia a la corrosión y a reactivos químicos, transparencia, alta durabilidad, facilidad de procesamiento y costos relativamente bajos (Shrivastava, 2018).

Así, las matrices poliméricas sintéticas pueden ser de dos tipos: termoestables y termoplásticas (Guerrero et al., 2013). Las matrices termoestables tienen múltiples enlaces entrecruzados en una estructura de red tridimensional. Son polimerizadas por una reacción química que generalmente no es reversible. No son fáciles de reprocesar después de las reacciones de entrecruzamiento, lo que hace difícil su reciclaje. No se funden al calentarse, sino que empiezan a degradarse. Se caracterizan por su alta resistencia y rigidez. Algunos ejemplos son la resina epoxi, el poliéster y el poliuretano.

Las matrices termoplásticas se pueden fundir y moldear repetidamente usando calor. Cuando se enfrían, vuelven a endurecerse. Debido a que es un proceso físico, puede repetirse en cualquier momento, lo que hace que estos materiales sean reciclables. Algunos ejemplos son el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno (PS) y el tereftalato de polietileno (PET), (Gilbert, 2017).

Los materiales a base de polímeros termoplásticos, tienen un alto consumo global y sus aplicaciones van desde utensilios desechables, vestimenta, embalajes y construcción hasta ingeniería, medicina o la industria aeroespacial (Gilbert, 2017; Zhu et al., 2016).

El consumo de materiales plásticos se ha generalizado a nivel mundial, con un crecimiento que ha ido a la par con el aumento demográfico y el desarrollo de la sociedad (Geyer et al., 2017). En 2020, se produjeron 367,000 toneladas de plástico virgen en todo el mundo, si la producción y consumo de plásticos continúa con la tendencia marcada, se prevé que en 2050 se alcance una producción de 1,120,000 t (Hong & Chen, 2019).

El consumo masivo de materiales plásticos ha llevado a una acumulación de basura y desechos en todo el mundo, debido a su alta durabilidad, a su baja biodegradación, y al modelo de economía lineal de producción y eliminación que siguen estos materiales (Aldas et al., 2021; Hong & Chen, 2019). Adicionalmente, la emergencia sanitaria producida por la pandemia de coronavirus (COVID-19) ha empeorado el problema de la contaminación plástica con el aumento de productos y materiales de un solo uso por razones de salud, higiene y seguridad. Se estima que en 2020 se ha producido un total de 585,000 t de basura plástica en todo el mundo (Benson et al., 2021). Cabe añadir que la industria plástica está altamente relacionada con la industria petroquímica, siendo el etileno, el principal material para la producción de polímeros (Rodriguez et al., 2014). De este modo, el modelo de economía lineal no solo agota rápidamente los recursos fósiles finitos, sino que también está generando graves consecuencias medioambientales en todo el mundo (Hong & Chen, 2019).

En este contexto, se ha llevado a una concienciación general de la necesidad de cambiar el modelo de producción y consumo de materiales plásticos a una economía circular que permita aprovechar los recursos de manera sostenible (Hong & Chen, 2019; Gilbert, 2017). Una economía circular es un sistema económico y de producción que busca maximizar la reutilización y el reciclaje de recursos, y de esta forma extender el ciclo de vida de los productos y minimizar los desechos (Di Bartolo et al., 2021).

En este sentido, los polímeros naturales se han explorado como alternativas para producir materiales con propiedades similares a los plásticos convencionales pero con la diferencia de que estos nuevos materiales, por su origen natural y renovable, no tendrán un impacto negativo en el medio ambiente.

2.3 Biocompuestos

Actualmente existe un gran interés en las fuentes renovables para producir materias primas empleadas en la producción de biocompuestos (Nicholas, 2014), que son una gama de materiales con diferentes propiedades y aplicaciones que pueden ser bio-basados o biodegradables, o tener estas dos propiedades a la vez (European Bioplastics, 2018).

Los materiales bio-basados se componen de forma total o parcial por biomasa como productos biológicos, materiales agrícolas renovables, aceites, productos de fermentación, o materiales forestales (Greene, 2021). Se obtienen a partir de la producción o derivados de organismos vivos y pueden ser o no biodegradables (Christian, 2016; Queiroz & Collares-Queiroz, 2009).

Los materiales biodegradables son capaces de descomponerse en gases como dióxido de carbono, metano y agua debido a la acción enzimática de microorganismos, en un periodo de tiempo definido, a una temperatura determinada, y en un ambiente específico como: compost, ambiente marino, vertedero, tierra o digestor anaerobio (Greene, 2021; Song et al., 2009). El proceso de biodegradación es un proceso químico, que depende de la estructura química del material y no de su origen, por lo tanto, pueden existir compósitos de origen fósil biodegradables y compósitos bio-basados que no son biodegradables (European Bioplastics, 2018).

El potencial de los biocompuestos para producir materiales sostenibles y reducir la dependencia de los combustibles fósiles han permitido su introducción en la industria del plástico que actualmente busca un cambio de modelo de producción hacia una economía circular (Calleja, 2019).

Se considera que la inserción de estos nuevos materiales en el sistema productivo permitirá aliviar la dependencia económica en los combustibles fósiles, que son recursos limitados. Mientras que los materiales biodegradables, ayudarían a mitigar el impacto ambiental de los plásticos que no pueden ser reciclados o cuyo consumo no se puede controlar de manera efectiva (Di Bartolo et al., 2021).

En el mercado actual predominan las matrices de polímeros sintéticos en materiales compuestos, aún, cuando se ha demostrado los graves problemas de contaminación ambiental que genera, debido a los grandes volúmenes acumulados, a su prolongado tiempo para degradarse (hasta 500 años) y a los procesos costosos para reciclarse (Pellis et al., 2021). Es por esta situación, que en los últimos años se han probado resinas provenientes de fuentes naturales, para emplearse como matriz en materiales compuestos para minimizar el impacto ambiental.

2.4 Resinas naturales

La palabra “resina” es designada a las secreciones de hidrocarburos amorfos de árboles o plantas que se endurecen cuando están en contacto con el aire convirtiéndose en un sólido amorfo. Las resinas presentan variabilidad en sus propiedades físicas de manera que pueden ser de suaves a frágiles, de translúcidas a opacas, y de coloración amarillenta a negra (Collin, 2014; Termentzi et al., 2011; Ciesla, 2009; Langenheim, 1990). En cuanto a sus características químicas, las resinas son insolubles en agua y solubles en alcohol, éter, y otros solventes orgánicos; se suavizan con el calor y se funden formando un líquido más claro y pegajoso; son inflamables, y resistentes al deterioro (Barry et al., 1927).

En las plantas, la resina cumple una función biológica de defensa contra el ataque de plagas (Da Silva Rodrigues-Corrêa et al., 2013; Franceschi et al., 2005; Langenheim, 1990). Cuando la corteza de las plantas presenta algún daño por heridas o por el ataque de un organismo invasor, la resina es expulsada a la superficie donde puede repeler el organismo, atraparlo o matarlo (Ciesla, 2009; Franceschi et al., 2005); además, una vez que los componentes volátiles de la resina se evaporan, los componentes no volátiles crean una capa protectora que sella la herida y evita la entrada de hongos y otros microorganismos patógenos (Da Silva Rodrigues-Corrêa et al., 2013; Ciesla, 2009).

Las resinas naturales tienen propiedades amorfas y resinosas, pero no necesariamente tienen naturaleza polimérica. Sus características amorfas están dadas por la inhibición de la cristalización que produce la compleja mezcla de compuestos que la conforman (Mills & White, 1977).

En general, están formadas por mezclas de terpenos, ácidos carboxílicos, aceites esenciales, alcoholes, aldehídos, ésteres, sustancias amorfas neutras y metabolitos secundarios (Termentzi et al., 2011; Langenheim, 1990). Su contenido y composición depende del origen de la resina y puede cambiar debido a procesos de oxidación o polimerización (Chiavari et al., 2002; Mills & White, 1977).

Las resinas son uno de los productos más antiguos extraídos de los árboles y se usaban desde la antigüedad con múltiples aplicaciones. Tradicionalmente, por sus propiedades antimicrobianas, las resinas se empleaban como antiinflamatorios, antitusivo y analgésicos (Termentzi et al., 2011), y en la medicina china y otras medicinas populares se empleaban para curar heridas, enfermedades de la piel, quemaduras, o como tratamiento antiulceroso (Sipponen & Laitinen, 2011).

La fuente de resina natural más conocida y usada son las coníferas (Ciesla, 2009; Sierra-Alvarez & Lettinga, 1990). Las coníferas están constituidas por más de 600 especies y tienen los organismos vivos más antiguos de la tierra (Phillips & Croteau, 1999). Todas las coníferas sintetizan una mezcla compleja de monoterpenoides, sesquiterpenoides y diterpenoides en forma de resina (Hall et al., 2013). Las resinas son consideradas como el producto forestal no maderable de mayor importancia económica que se extrae de los árboles (Corredor et al., 2013), debido a que sus componentes (monoterpenoides, sesquiterpenoides y diterpenoides) constituyen una fuente natural y renovable valiosa de precursores para diferentes industrias (Rodrigues-Corrêa et al., 2012). Las resinas se usan para la elaboración de una amplia gama de productos como lacas, barnices, pinturas, jabones, aceites esenciales, y pesticidas (Ciesla, 2009).

No obstante, no todas las coníferas producen resina en cantidades importantes para la industria, las familias Pinaceae, Cupressaceae y Araucariaceae son las que producen mayor cantidad de resina diterpenoidea (Langenheim, 1990; Mills & White, 1977), y la familia Pinaceae contiene los géneros más importantes de plantas de los cuales se extrae resina con fines comerciales, de los cuales el género *Pinus* es el primero (Langenheim, 1990).

2.4.1 Resina de pino

El Pino es un árbol del orden de las coníferas del género *Pinus* que sintetizan cantidades abundantes de resina como mecanismo de defensa ante el ataque de insectos o patógenos, estrés abiótico, estimulantes químicos o heridas mecánicas en su tallo, y la almacenan bajo presión en un sistema tridimensional de conductos de resina altamente desarrollados (Rodríguez-García et al., 2016).

La selección de pinos para la producción de resina de forma industrial depende de la calidad, determinada por el contenido de terpenoides, y la cantidad de resina obtenida, y estos factores están determinados tanto por los rasgos genéticos de cada especie de pino; edad de la planta, estatus fisiológico de la planta, así como por condiciones ambientales; disponibilidad de agua, temperatura, irradiación y fertilización (Da Silva Rodrigues-Corrêa et al., 2013).

A nivel mundial las especies de pino que se consideran productoras de resina varían dependiendo de la localización (Yadav et al., 2016; Ciesla, 2009). En China la resina se obtiene principalmente de *Pinus Massoniana*, en Indonesia de *Pinus Merkusii*, en Centroamérica y Sudamérica de *Pinus Oocarpa*, *Pinus Caribaea* y *Pinus Elliottii*, en España y Portugal de *Pinus Pinaster*. En México las especies de pino con mayor producción de resina en orden de importancia son: *Pinus Oocarpa*, *Pinus Leiophylla*, *P. Lawsonii*, *P. Teocote*, *P. Pseudostrobus* y *P. Montezumae* (SEMARNAT 2019) como se ilustra en la Figura 3.



Pinus Oocarpa



Pinus Leiophylla



Pinus Lawsonii



Pinus Teocote



Pinus Pseudostrobus



Pinus Montezumae

Figura 3. Pinos productores de resina en México.

En el sector resinero, la resina de pino una vez que sale del árbol, y hasta su purificación, se conoce como miera. La miera está compuesta por alrededor de 15% de una fracción volátil o esencia de trementina, 70% por una fracción sólida o colofonia y por 15 % de impurezas como insectos, corteza de árboles y agua (Picardo et al., 2009).

La esencia de trementina o aguarrás es una mezcla compleja de hidrocarburos, especialmente monoterpenoides y sesquiterpenoides, con altos contenidos de α - y β -pineno, además tiene toxinas (limoneno, 3 careno) y agentes biológicamente activos para emitir señales químicas u olfativas que desalienten la depredación de insectos y microbios, la principal función de la trementina es actuar como solvente de la colofonia y transportarla por los canales resiníferos del pino hasta las heridas producidas en la planta (Gourava, 2019; Da Silva Rodrigues-Corrêa et al., 2013; Savluchinske-Feio et al., 2006; Phillips & Croteau, 1999). La trementina se usa como

disolvente, aditivo de alimentos, saborizantes, intermediarios en la elaboración de vitaminas, compuestos en la producción de fragancias, agentes desinfectantes, en elaboración de adhesivos, cosméticos y pesticidas (Lakshmikumaran & Sridharan, 2018).

La colofonia está constituida principalmente por ácidos diterpénicos especialmente por abietanos, y su función es la de atrapar y matar a los atacantes de la planta y sellar la herida del tallo después de la volatilización de la trementina (Gourava, 2019; Da Silva Rodrigues-Corrêa et al., 2013; Savluchinske-Feio et al., 2006).

2.5 Colofonia

La colofonia es un material rígido de apariencia vidriosa con una coloración amarillenta y un olor característico de terebintina (Yadav et al., 2016). Es un material inflamable, que es insoluble en agua y soluble en solventes orgánicos como éter, alcohol, ácido acético glacial o cloroformo (Yadav et al., 2016; Rifé Lamprecht, 1949). La colofonia tiene un comportamiento termoplástico que cambia de estado, de sólido rígido a fluido viscoso, cuando se calienta. La colofonia no es un sólido cristalino, sino un vidrio, por lo que el cambio de estado no se da en un punto específico, sino que se reblandece gradualmente en un rango de temperaturas, y por lo tanto el punto en el que empieza a fluir cuando se calienta se conoce como punto de reblandecimiento y se encuentra entre los 70 y 80 °C (Cabaret et al., 2018).

La colofonia se clasifica por su forma de obtención en tres tipos: colofonia de miera, colofonia de madera y colofonia de tal oil, sus características se indican a continuación (Mahendra, 2019):

- Colofonia de miera (gum rosin): Es la colofonia más común, se obtiene a partir del procesamiento y destilado de la miera que se extrae de los pinos vivos mediante un proceso de resinación continua (Wilbon et al., 2013; Karlberg, 2012; Ciesla, 2009).

- Colofonia de madera (wood rosin): Es la colofonia que se obtiene a partir de tocones de pino envejecido, que se trituran y se sumergen en una solución disolvente que posteriormente se destila para separar la trementina (Ciesla, 2009; Maiti et al., 1989).
- Colofonia de tal oil (tal oil rosin): Es la colofonia que se obtiene de la destilación del licor negro (crude tal oil) como un coproducto del proceso Kraft de fabricación de pulpa de celulosa a partir de coníferas (Wilbon et al., 2013; Ciesla, 2009).

Independientemente de la forma de obtención, las colofonias tienen una composición similar, un 90 a 95 % de mezclas de ácidos carboxílicos cíclicos isoméricos de fórmula molecular $C_{19}H_{29}COOH$ (anillos hidrofenantreno) y de 5 a 10 % de sustancias neutras como alcoholes, aldehídos, e hidrocarburos (Yadav et al., 2016; Wiyono & Tachibana, 2008; Rifé Lamprecht, 1949). Hay dos tipos de ácidos resínicos en la colofonia: el tipo abiético (~ 60 %) se caracteriza por la presencia de un grupo isopropílico en la posición 7, además tiene dobles enlaces conjugados en las posiciones 7-8 y el tipo pimárico (20 - 25 %) tiene grupos vinilo y metilo en la posición 7 (Yadav et al., 2016; Scalarone et al., 2002; Hernández & Vanegas, 2001). Sin embargo, el contenido de isómeros en estas mezclas de ácidos resínicos difiere en cada colofonia, ya que dependerá de la forma de obtención, la especie de pino (Mahendra, 2019) y el procesamiento térmico de la colofonia, cuyos ácidos al ser calentados se isomerizan, dando generalmente una mezcla rica en ácido abiético y casi sin ácido levopimárico, el cual sí está presente en la miera (Scalarone et al., 2002). Las estructuras químicas de ácidos del tipo abiético y pimárico se muestran en la Figura 4.

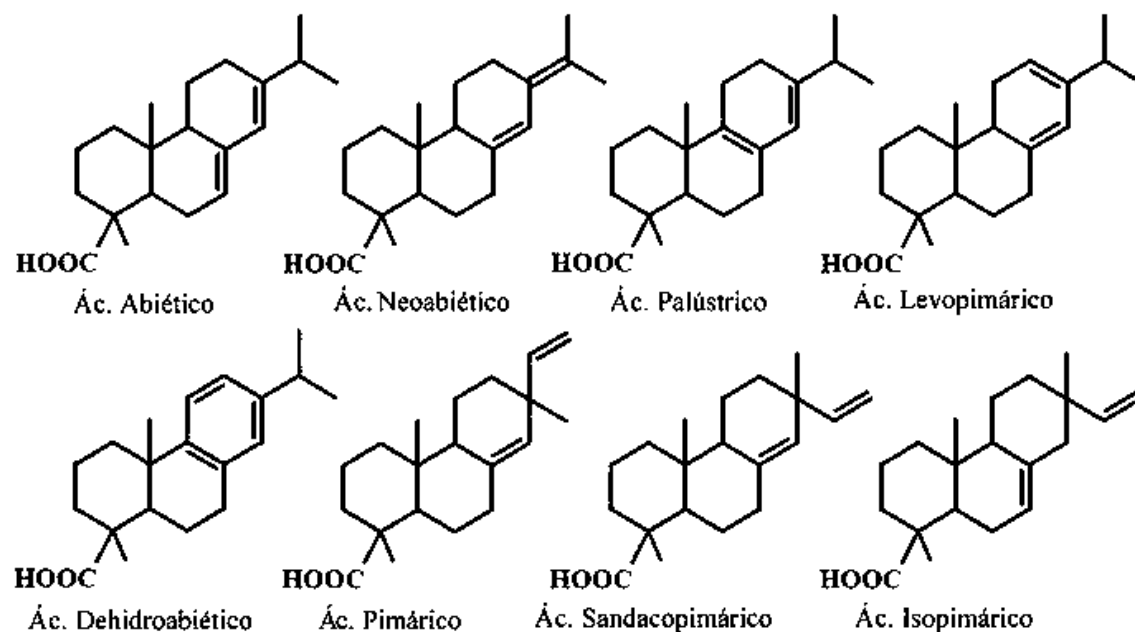


Figura 4. Estructuras químicas de los ácidos resínicos de colofonia.

En 2020 la producción mundial de colofonia fue de 1, 157,000 t de las cuales 745,000 t (64.4 %) fueron de colofonia de miera, 402,000 t (34.7 %) colofonia de tall oil y 10,000 t (0.09 %) colofonia de madera (Harima Chemicals Group Inc., 2021). Además, China fue el mayor productor de colofonia de miera con 320,000 t, y Estados Unidos el mayor productor de colofonia de Tall oil con 180,000 t (Harima Chemicals Group Inc., 2021). En 2020 México produjo 8,841 t de colofonia de miera, la producción se concentra en los estados de Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Estado de México, siendo Michoacán el que genera más del 90% de la producción nacional. (Secretaría de Economía México, 2022).

De los criterios establecidos generalmente el color y el punto de reblandecimiento suelen ser indicadores suficientes de la calidad de una colofonia (Coppen & Hone, 1995). Por un lado, el color de la colofonia se clasifica en seis grados, siendo el más pálido el más deseable, designado como WW (Water-White), seguido del WG (Window-Glass), y un grado superior designado como X que también se comercializa. Mientras que los grados más oscuros N, M, K son menos deseables. Por otro lado, el punto de reblandecimiento de la colofonia se encuentra entre 70 a 80 °C,

considerándose de mejor calidad a las colofonias con mayor punto de reblandecimiento (Yadav et al., 2016; Coppen & Hone, 1995; Rifé Lamprecht, 1949).

Un parámetro importante que indica la calidad de la colofonia, sobre todo si se busca usar la colofonia para obtener derivados, es la acidez del material caracterizada por el número ácido. Las colofonias de mejor calidad tienen números ácidos altos, entre 160 a 170. Por el contrario, la cantidad de material saponificable de la colofonia (cantidad de material no ácido en la colofonia) debe ser inferior al 10% para ser considerada de buena calidad (Coppen & Hone, 1995).

La colofonia generalmente es modificada para darle funcionalidad y obtener aplicaciones específicas en la industria. La colofonia modificada puede ser colofonia polimerizada, sales, dímeros, ésteres, colofonias hidrogenadas, entre otras. Las colofonias se usan en diversas industrias para fabricar una gran variedad de productos como: adhesivos y tintas, gomas de mascar, estabilizantes de bebidas, barnices, cosméticos, llantas de automóviles, papel, y recubrimientos (Lakshmikumaran & Sridharan, 2018).

En los últimos años varios grupos de investigación, han producido una variedad de materiales poliméricos bien definidos basados en ácidos de colofonia, dichos polímeros modificados se han desarrollado como biomateriales efectivos (Ganewatta et al. 2015; Ganewatta et al. 2014; Chen et al. 2013; Chen et al. 2012).

2.6 Obtención de colofonia de miera

Para obtener colofonia de miera, la resina se extrae de los pinos mediante un proceso conocido como resinación, posteriormente la resina es purificada y procesada mediante destilación para separar las fracciones de trementina y de colofonia de la resina de pino (Picardo et al., 2009).

2.6.1 Resinación

La resinación es el proceso de extracción de la resina de los árboles con fines comerciales. Consiste en realizar una incisión en el árbol para activar la secreción de resina (Marilys, 2013; Bohlmann & Keeling, 2008).

Existen diferentes técnicas para extraer la resina del árbol: el método Francés o de Hugues, el método de espina de pescado, la pica de corteza ascendente y descendente, y el método mecanizado (Marilys, 2013; Cunningham, 2012). En México la técnica de resinación más utilizada es el método tradicional francés modificado como se ilustra en la Figura 5, actualmente está sustentado en una Norma Oficial Mexicana (NOM 026-SEMARNAT, 2005) y consta de las siguientes etapas:

- Incisión: se realiza una pequeña herida en forma de canal en el fuste del pino, se denomina cara, ésta no debe exceder los 10 cm de ancho y la profundidad no debe ser mayor a 2 cm, es en esa herida donde se realiza la resinación.

- Instalación del sistema de recolección de resina: se coloca una pequeña lámina o visera (puede ser de zinc o hierro galvanizado) para dirigir la resina hacia un recipiente colector que se coloca debajo de la visera sujeto al árbol, este puede ser de barro o plástico.

- Pica: se realizan incisiones de manera ascendente a lo largo del fuste del árbol para inducir el flujo de resina, se hacen de manera periódica (semanalmente) el tamaño de estas incisiones debe ser de 1 cm aproximadamente.

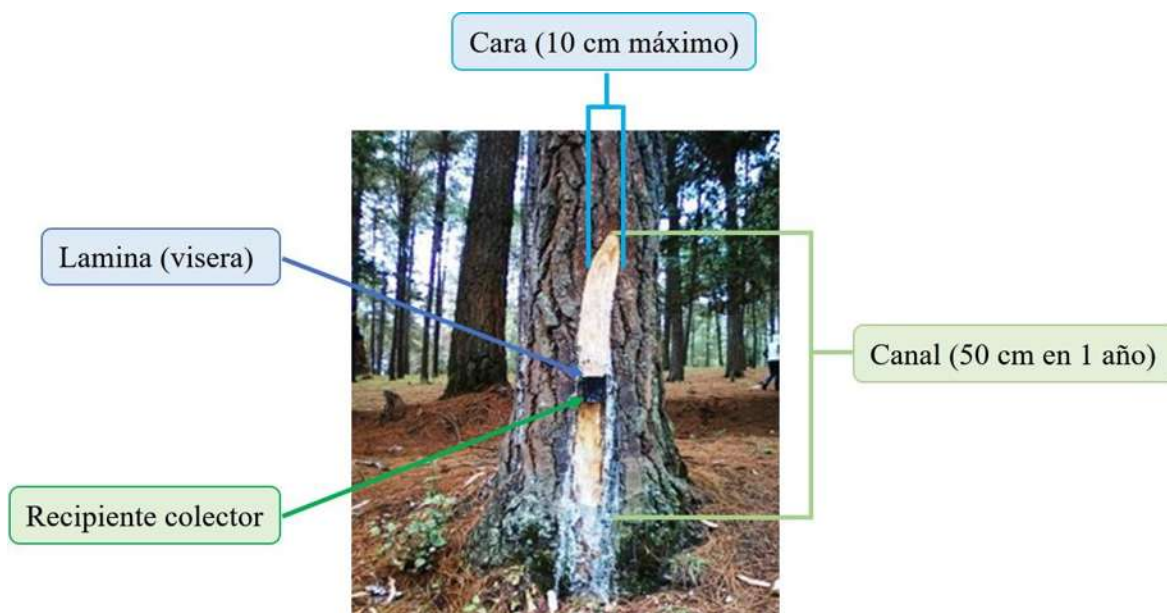


Figura 5. Resinación método Hugues modificado.

Se denomina método ascendente porque se van realizando picas que van incrementando el tamaño del canal en la cara a lo largo del fuste del árbol (50 cm por año), la visera y el recipiente se van situando a mayor altura conforme avanza el tiempo de recolección. Este proceso se realiza hasta por cinco años completando un tamaño de canal de 2.5 metros a lo largo del fuste del pino, después se trabaja sobre una nueva cara en el pino a un lado de la anterior con un espaciado entre caras mínimo de 10 cm. El aprovechamiento de resina se permite en árboles con tamaños de diámetros del tronco mayores de 25 cm. En un pino de gran diámetro (mayor a 50 cm) generalmente se pueden abrir hasta cinco caras, por lo que la resinación puede llevarse a cabo durante 25 años (Marylis, 2013; Ortega et al., 2013).

La resinación de los pinos es una actividad de aprovechamiento activa, los árboles siguen vivos durante el proceso de obtención de la resina, de tal manera que los bosques siguen proporcionando sus servicios ambientales como aire limpio, regulación del clima, conservación de los recursos hidrológicos, entre muchos otros. La resinación se puede considerar una actividad sostenible, a través de ella se garantiza el cuidado y conservación de los bosques.

2.6.2 Destilación

La miera recolectada se limpia y se acondiciona, se mezcla con trementina para diluirla y se calienta para aumentar su fluidez, después pasa por un proceso de filtración para quitar las impurezas sólidas presentes como restos de corteza e insectos. Posteriormente la resina pasa a un proceso de decantación para separar el agua y los sólidos en suspensión (Rifé Lamprecht, 1949). La resina acondicionada pasa al proceso de destilación fraccionada, por arrastre con vapor de agua, para separar las fracciones de interés aprovechando la mayor volatilidad de la trementina. El aceite de trementina se evapora junto con el agua presente, se condensa y pasa a un separador de fases para ser recolectada y almacenada. La colofonia queda en el reactor y pasa a un proceso de enfriamiento después del cual se almacena en estado sólido (Rifé Lamprecht, 1949).

Finalmente, estos subproductos de la resina de pino se procesan para su uso posterior en la fabricación de diversos productos industriales (Silvestre & Gandini, 2008)

2.7 Modificaciones de la colofonia

La colofonia está constituida por moléculas ácidas (ácido abiético y pimárico e isómeros) que tienen dos centros reactivos: el grupo carboxílico y los dobles enlaces, que están conjugados en los ácidos abiéticos y no conjugados en los ácidos pimáricos. La alta acidez e insaturación de la colofonia le provocan inestabilidad como material, ya que tiende a oxidarse cuando se halla en estado puro, pero también le proporcionan reactividad que la convierten en un material adecuado para la exploración química (Yao & Tang, 2013; Mills & White, 1977). Otra característica que hacen que la colofonia sea interesante para la síntesis de compuestos es su naturaleza anfipática, es decir que tiene propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas (Sifontes et al., 2014). Un esquema con los grupos reactivos y la naturaleza anfipática del ácido abiético, que es el mayor componente de la colofonia, y el ácido pimárico se presentan en la Figura 6.

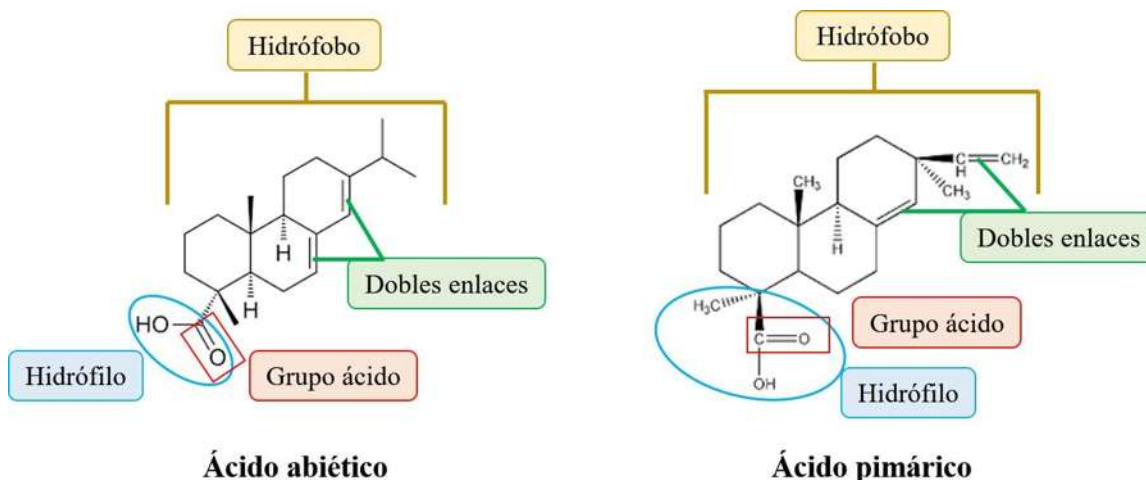


Figura 6. Grupos reactivos y naturaleza anfipática de los ácidos abiético y pimárico.

La colofonia generalmente se modifica ya que en su estado prístino presenta alta acidez, alta rigidez, baja temperatura de transición vítrea. La modificación de los ácidos resinosos se puede realizar mediante reacciones en el grupo ácido de los ácidos abiéticos y pimáricos o reacciones en un sistema olefínico de dobles enlaces conjugados de los ácidos abiéticos (Abdel-Raouf et al., 2018). Los derivados que se obtienen son: sales, ésteres aductos de anhídrido maleico, colofonias hidrogenadas y colofonias desproporcionadas (Yadav et al., 2016).

2.8 Refuerzos en materiales compuestos

Para fabricar materiales compuestos generalmente se combina la matriz con materiales de refuerzo, con el objetivo de mejorar su procesabilidad, aumentar su rendimiento o para modificar las propiedades del compósito, como la rigidez y la resistencia. Se añaden en contenidos del 15 al 30% en peso, ejemplos fibra de vidrio, fibra de carbono (Hahladakis et al., 2018; Al-Malaika et al., 2017; Andrady et al., 2016).

2.8.1 Refuerzos con partículas

El presente trabajo se centra en los materiales compuestos reforzados con partículas, dónde el refuerzo es de naturaleza de partículas. Puede ser esférico, cúbico, tetragonal, una plaqueta o de otra forma regular o irregular. En general, las partículas no son muy efectivas para mejorar la

resistencia a la fractura, pero mejoran la rigidez del material compuesto hasta cierto punto. Los rellenos de partículas se usan ampliamente para mejorar las propiedades de los materiales de la matriz, como modificar la conductividad térmica y eléctrica, mejorar el rendimiento a temperaturas elevadas, reducir la fricción, aumentar la resistencia al desgaste y a la abrasión, mejorar la maquinabilidad, aumentar la dureza de la superficie y reducir la contracción (Dagade & Shaikh, 2015).

Las partículas que se emplean en estos materiales pueden obtenerse de fibras naturales a partir de minerales, animales o vegetales siendo esta última la principal fuente por su amplia disponibilidad y origen renovable, ya que se encuentran distribuidos en la naturaleza en forma de cultivos, árboles y plantas.

2.8.2 Cáscara de arroz (CA)

La cáscara de arroz es una nueva fuente renovable potencial de refuerzo en compósitos para obtener productos verdes. La cáscara de arroz es la cubierta externa del grano de arroz; es un subproducto del proceso de molienda de arroz. Es un material de desecho agrícola en todos los países productores de arroz.

Los componentes principales de CA son los materiales orgánicos como la hemicelulosa, la celulosa y la lignina, que suman alrededor del 75 al 90% y el contenido restante de cenizas del 17 al 20% (Tribe, 1974). La ceniza se compone principalmente de más del 90% de sílice y algunas impurezas metálicas. La combustión de cáscara de arroz en condiciones controladas conduce a la producción de cenizas que contienen sílice casi pura. Los pretratamientos con ácido clorhídrico, ácido sulfúrico o ácido nítrico antes de la combustión podrían eliminar las impurezas metálicas como el hierro (Fe), manganeso (Mn), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) que influyen en la pureza y el color de la sílice (Yalcin & Sevinc, 2001).

Se han realizado numerosos esfuerzos para utilizar la cáscara de arroz como materia prima para la fabricación de productos industriales basados en compuestos de sílice (Aridi et al., 2017).

2.8.3 Sílice de cáscara de arroz

Después de la quema controlada de CA, el contenido de cenizas está compuesto por un 95% de sílice amorfa (biosílice), que tiene un tamaño de partícula muy fino con alta pureza, gran superficie y elevada porosidad (Wang et al., 2012; Adam et al., 2011). La ceniza de la cáscara de arroz también se considera como una de las fuentes de sílice más baratas y ecológicas, que también es de naturaleza hidrófila. Las partículas más pequeñas tienen un área de superficie específica más alta, lo que proporciona una mejor interacción entre matriz-relleno y da como resultado propiedades mejoradas para los compuestos. La ceniza de CA puede usarse como material de valor agregado o como sustituto de bajo costo y también para impartir algunas propiedades extraordinarias a la matriz (Rattanasak et al., 2010; Zhang et al., 2010). La intención principal de agregar refuerzos a la matriz, es para impartir algunas propiedades especiales como mecánica mejorada, retardante de llama, constante dieléctrica, etc., además de la reducción de costos.

Bien, tanto colofonia como biosílice de cáscara de arroz se han empleado de manera independiente en la elaboración de diversos compósitos y modificación de materiales. En cuanto a la formación de un compósito a partir de colofonia y biosílice no hay investigación reportada; solo un estudio publicado por Wu et al. (2016) es semejante. Ellos formaron híbridos a partir de un derivado de colofonia y nanosílice sintética modificada, reportaron incrementos en la temperatura de degradación, dureza y resistencia química.

La presente investigación pretende generar conocimiento sobre compósitos formados por colofonia y biosílice, variando el contenido de biosílice de 5 a 20% respecto a colofonia. Es importante conocer las propiedades que poseen estos compósitos, para sentar las bases prácticas antes de hacer cualquier modificación física o química a los materiales puros. Además de conocer el comportamiento termogravimétrico y la dureza de CB sobre lo que se tenía un precedente comparable (Wu et al., 2016), también se investigó su capacidad para absorber agua, humectabilidad de la superficie, resistencia a la flama, asociación molecular por FTIR y MEB. A partir de estos conocimientos, se avanzó en la generación de otros compósitos, a partir de colofonia hidroxilada y biosílice hidroxilada, se exploraron los cambios en las propiedades al modificar los componentes iniciales.

Esta tesis doctoral se centra en conocer las propiedades de los compósitos colofonia-biosílice, para posteriormente compararlas con las propiedades de los compósitos donde se modifican los componentes iniciales. Aportando conocimiento en el área de materiales sostenibles y brindando alternativas renovables y de bajo costo a materias primas y productos sintéticos.

III. METODOLOGÍA

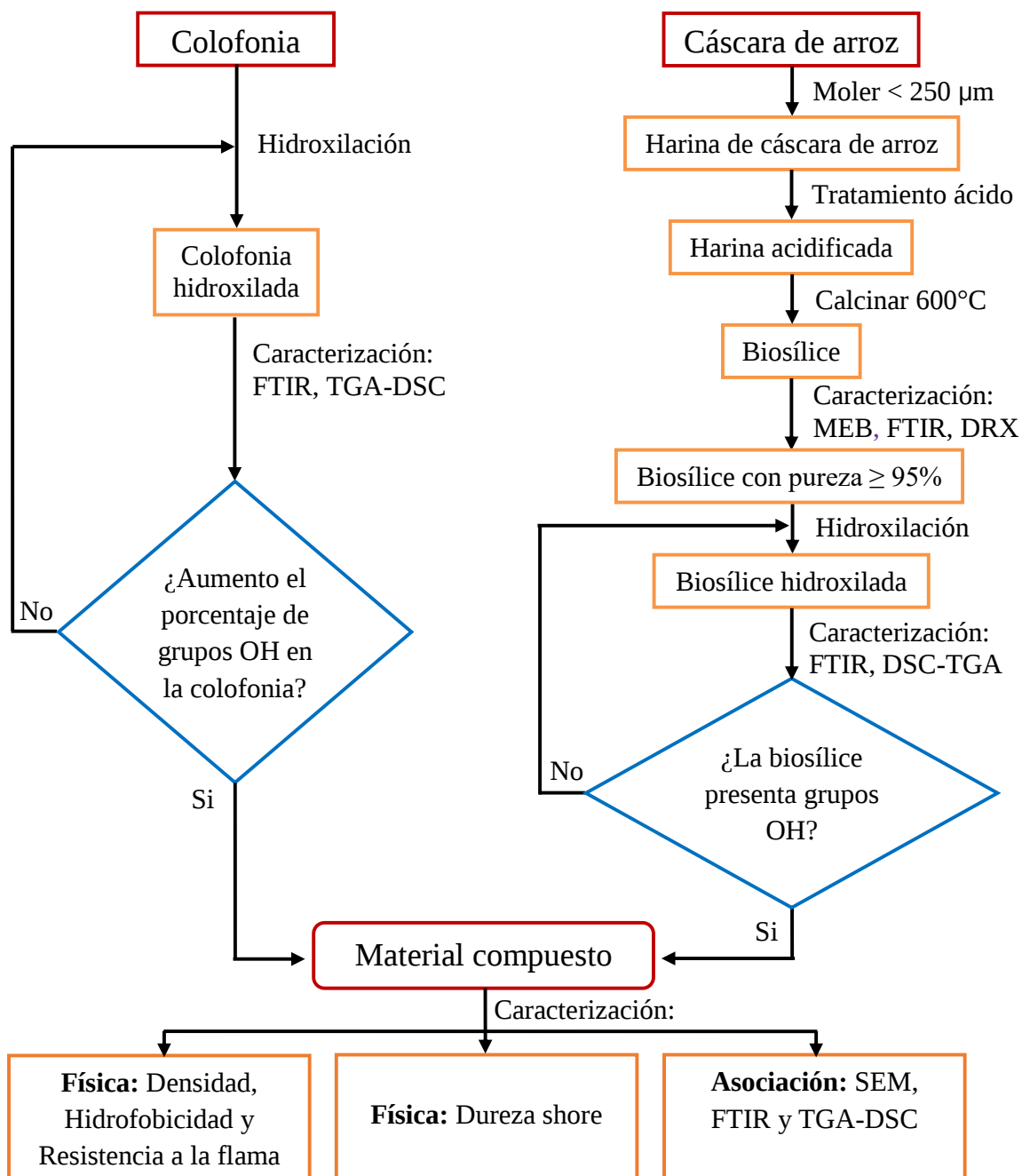


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología para obtener los materiales compuestos.

El esquema de la Figura 7, representa de forma visual la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de esta investigación.

3.1. Reactivos, Materiales y Productos

3.1.1. Reactivos

Acetona (C_3H_6O). Peso molecular 58.08 g/mol. Líquido incoloro de olor característico, se evapora fácilmente, punto de ebullición 56°C.

Ácido clorhídrico (HCl). Se adquirió de Sigma Aldrich y se preparó una solución de HCl 0.5M.

Ácido m-cloroperoxibenzoico ($C_7H_5ClO_3$). Peso molecular 172.57 g/mol. Polvo blanco, es un fuerte agente oxidante con densidad de 0.56 g/cm³.

Bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$). Peso molecular 84.007 g/mol. Compuesto sólido cristalino de color blanco soluble en agua.

Biftalato de potasio ($C_8H_5KO_4$). Peso molecular 204.22 g/mol. Es sólido, estable al aire y soluble en agua con densidad de 1.64 g/cm³.

Diclorometano (CH_2Cl_2). Peso molar 84.93 g/mol. Es un líquido incoloro, posee un leve aroma dulce con densidad de 1.33 g/cm³ y un punto de ebullición de 39.6 °C.

Etanol (C_2H_5OH). Peso molecular 46.07 g/mol. Es un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78.4 °C, punto de fusión 114°C, punto de inflamabilidad 13°C, densidad 0.78 g/cm³.

Fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$). Peso molecular 318.32 g/mol. Es un indicador de pH que en disoluciones acidas permanece incoloro, en presencia de disoluciones básicas toma un color rosado. Es un polvo blanco con densidad de 1.27 g/cm³, punto de fusión 258 °C.

Glicerina ($C_3H_8O_3$). Peso molecular 92.09 g/mol. Es un alcohol con tres grupos hidroxilos con punto de ebullición de 290°C, densidad 1.26 g/cm³.

Hidróxido de Potasio (KOH). Peso molecular de 56.11 g/mol. Son hojuelas blancas, es higroscópico (absorbe agua de la atmósfera), punto de fusión 360 °C, densidad 2.04 g/cm³.

Tolueno (C_7H_8). Peso molecular 92.13 g/mol. Líquido incoloro, aroma característico, poco soluble en agua, miscible con éter, acetona, etanol, cloroformo. Temperatura de ebullición 110°C, densidad 0.86 g/cm³ a 25°C.

3.1.2. Obtención de biosílíce a partir de cáscara de arroz

La cáscara de arroz fue donada por la organización Arroceros del Valle del Márquez S.P.R. de R.L. ubicada en el municipio de Lombardía, Michoacán. A partir de ella se obtuvo la biosílíce. El procedimiento se describe e ilustra en la Figura 8, con base en lo descrito por Rahmaniar & Susanto (2019) y Bakar et al. (2016).

a). Purificación. La CA se lavó con agua destilada agitando durante 10 minutos. Al término de este tiempo el agua se decantó y la cáscara de arroz se dejó secar a temperatura ambiente durante 1 semana.

b). Molido y cribado. La CA purificada, se molió en un molino manual. Posterior a esto, se cribó en un tamizador Ro-Tap RX-29 utilizando mallas de número 20, 40 y 60. Para nuestro interés se utilizó la fracción de la malla 60, es decir, las partículas con un tamaño menor a 250 µm. La harina de cáscara de arroz (HCA) se colocó en el horno de secado a 105°C hasta obtener peso constante.

c). Pretratamiento químico. La harina de cáscara de arroz previamente acondicionada se mezcló con la solución de HCl 0.5M agregando 10% en peso de HCA. La mezcla se mantuvo en agitación durante 30 minutos a 60°C. Posterior a ello, se filtró y se lavó 3 veces con agua destilada

para neutralizar. La HCA pretratada se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas, posteriormente se colocó en el horno a 105°C por 4 horas, obteniendo una HCA anhidra.



Figura 8. Proceso de obtención de biosílice a partir de cáscara de arroz.

3.1.3. Hidroxilación de la biosílice

Inicialmente la biosílice se deshidrató calentándose a 400°C durante 16 horas, utilizando crisoles de porcelana. Posteriormente la biosílice se puso en contacto con vapor de agua durante 36 horas a presión de vapor (Figura 9) cercana a la saturación para asegurar la presencia de agua líquida en la superficie. A continuación, se eliminó el agua fisisorbida de la biosílice por evacuación hasta peso constante a temperatura ambiente. Siguiendo el método descrito por Hockey & Pethica (1961).



Figura 9. Proceso de hidroxilación de biosílice.

3.1.4. Obtención de colofonia e hidroxilación

La colofonia se obtuvo de la procesadora de resinas La Soledad S.A. de C.V. ubicada en ciudad industrial, Morelia, Michoacán. Es una colofonia estándar como lo especifica el certificado de calidad emitido por el proveedor.

a). Síntesis de ácido abiético epoxidado e isómeros

Siguiendo el procedimiento descrito por (Brocas et al., 2014; Valverde et al., 1986). Los ácidos de colofonia se disolvieron en 30 ml de diclorometano en un matraz de 100 ml equipado con un agitador y un controlador de temperatura. Se agregaron 8g de ácido 3-cloroperoxibenzoico a la solución antes de enfriar la mezcla a -5°C como se indica en la Figura 10. Después de 10 horas de reacción, la solución se agitó con 30 ml de una solución saturada de bicarbonato de sodio durante 2 horas. Posteriormente el producto se separó de la fracción orgánica y el solvente se eliminó a presión reducida.

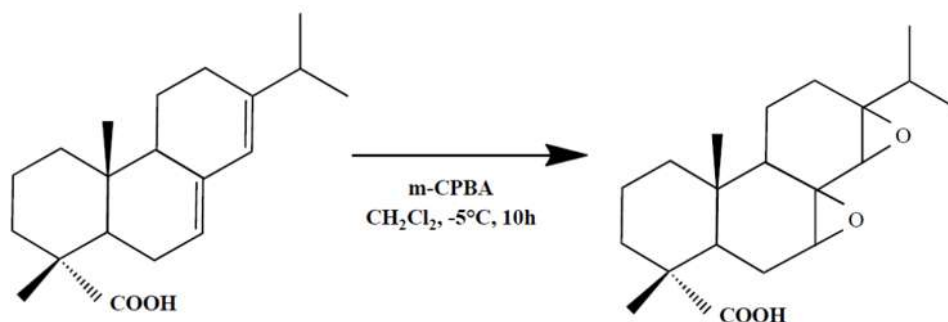


Figura 10. Síntesis de ácido abiético epoxidado.

b). Síntesis de ácido hidroxabiético e isómeros

El ácido abiético e isómeros epoxidados se disolvieron en 10 ml de etanol y 50 ml de agua en un matraz de 100 ml equipado con un agitador y un controlador de temperatura. La solución se calentó a 90°C durante 36 horas como se ilustra en la Figura 11. Después que la solución se enfrió, se añadieron 40 ml de diclorometano. El producto se separó y el solvente se evaporó a presión reducida (Brocas et al., 2014).

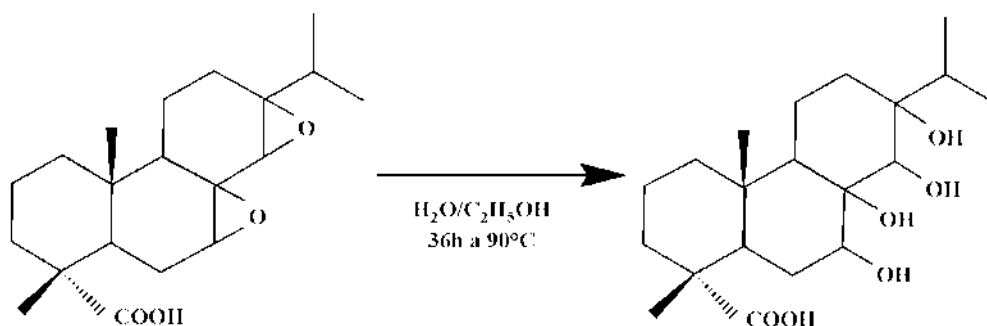


Figura 11. Síntesis de ácido hidroxi abiético.

3.1.5. Elaboración de los materiales compuestos

El procedimiento para elaborar un compuesto de colofonia-biosílice consiste en: colocar la muestra de colofonia en una charola de aluminio y calentar a 90°C , una vez que se funde se agrega biosílice, la mezcla se homogeniza con agitación manual durante 5 minutos aproximadamente, después se vierte en un molde metálico, donde permanece 48 horas para su desmolde.

La cantidad de colofonia y biosílice empleada dependen del tamaño de la probeta a realizar, en este caso se hicieron 2 diferentes probetas: una de forma cuadrada con dimensiones de 50 mm x 50 mm x 10 mm y la otra de forma rectangular con dimensiones de 125 mm x 13 mm x 7 mm.

Para la probeta cuadrada se requieren 12 g de masa total, de los cuales se emplean 11.4 g de colofonia y 0.6 g de biosílice para el compuesto colofonia-biosílice 5%. Se van ajustando las cantidades para los diferentes porcentajes de biosílice.

Para la probeta rectangular se requieren 20 g de masa total, de los cuales se emplean 19 g de colofonia y 1 g de biosílice para el compuesto colofonia-biosílice 5%. Se van ajustando las cantidades para los diferentes porcentajes de biosílice.

Este procedimiento es general para los diferentes materiales compuestos: colofonia-biosílice (CB), colofonia hidroxilada-biosílice (ChxB), colofonia-biosílice hidroxilada (CBhx) y colofonia hidroxilada-biosílice hidroxilada (ChxBhx).

a). Colofonia-Biosílice (CB)

El material compuesto se obtuvo mezclando colofonia con biosílice (Figura 12). Se colocó una charola de aluminio con la muestra de colofonia sobre una placa de calentamiento, la colofonia se calentó a 90°C aproximadamente. Una vez que se fundió la colofonia se agregó la biosílice, la mezcla se homogenizó con agitación manual, para posteriormente verterse en los moldes. Se utilizó 0, 5, 10, 15 y 20 % en peso de biosílice. Se obtuvieron: CB0, CB5, CB10, CB15 y CB20.



Figura 12. Material compuesto a partir de colofonia-biosílice.

b). Colofonia hidroxilada-Biosílice (ChxB)

Para obtener el material compuesto se mezcló colofonia hidroxilada con biosílice (Figura 13). Se colocó una charola de aluminio con la muestra de colofonia hidroxilada sobre una placa de calentamiento, se calentó a 90°C aproximadamente. Una vez alcanzada dicha temperatura se agregó la biosílice, la mezcla se homogenizó con agitación manual, para posteriormente verterse en los moldes. Se utilizó 5, 10, 15 y 20 % en peso de biosílice. Se obtuvieron: ChxB5, ChxB10, ChxB15, ChxB20.



Figura 13. Material compuesto a partir de colofonia hidroxilada-biosílice.

c). Colofonia-Biosílice hidroxilada (CBhx)

Para obtener el material compuesto se mezcló colofonia con biosílice hidroxilada (Figura 14). Se colocó una charola de aluminio con la muestra de colofonia sobre una placa de calentamiento, se calentó a 90°C aproximadamente. Una vez que se fundió la colofonia se agregó la biosílice hidroxilada, la mezcla se homogenizó con agitación manual, para posteriormente verterse en los moldes. Se utilizó 5, 10, 15 y 20 % en peso de biosílice. Se obtuvieron: CBhx5, CBhx10, CBhx15, CBhx20.



Figura 14. Material compuesto a partir de colofonia-biosílice hidroxilada.

d). Colofonia hidroxilada-Biosílice hidroxilada (ChxBhx)

Para obtener el material compuesto se mezcló colofonia hidróxilada con biosílice hidróxilada (Figura 15). Para esto, se colocó una charola de aluminio con la muestra de colofonia hidroxilada sobre una placa de calentamiento a 90°C aproximadamente. Una vez alcanzada dicha temperatura se agregó la biosílice hidróxilada, la mezcla se homogenizó con agitación manual, para posteriormente verterse en los moldes. Se utilizó 5, 10, 15 y 20 % en peso de biosílice hidróxilada. Se obtuvieron: ChxBhx5, ChxBhx10, ChxBhx15, ChxBhx20.



Figura 15. Material compuesto a partir de colofonia hidroxilada-biosílice hidroxilada.

3.2. Mediciones y Caracterizaciones

3.2.1. Porcentaje de biosílice de cáscara de arroz

La harina de cáscara de arroz anhidra se colocó en un crisol de porcelana, previamente secado (600°C, 1h) y pesado, el cual se introdujo en una mufla a 100°C, para después aumentar la temperatura a 600°C y mantenerse constante durante 2 horas. El crisol con el residuo se retiró de la mufla se puso en un desecador, se enfrió y se pesó. El contenido de biosílice se calculó en porcentaje de HCA anhidra, a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Biosílice} = \frac{(WC - Wc)}{Wm} \times 100 \quad 1$$

Donde, WC es el peso del crisol con las cenizas, Wc es el peso del crisol vacío y Wm es el peso de la muestra de HCA.

3.2.2 Mediciones físicas y mecánicas

Esta caracterización se realizó mediante ensayos de densidad, absorción de agua, ángulo de contacto, resistencia a la flama y dureza shore.

a). Densidad

La densidad se define como la masa (m) por unidad de volumen (v) de un material. Indica que tan compactas están las moléculas en un material, también ayuda a predecir si el material puede flotar. La densidad se calculó a partir de probetas en forma de cubo, se pesaron en una balanza analítica registrando el peso en g, y se tomaron las medidas de la probeta con un vernier para determinar su volumen expresado en cm³, una vez obtenidos la masa y el volumen se empleó la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

2

Donde, m es la masa y V es el volumen.

b). Absorción de agua

Las pruebas de absorción de agua se realizarán de acuerdo con el estándar ASTM D 570-98. Se prepararon muestras con un tamaño de 50 mm x 50 mm x 10 mm de espesor. La prueba consiste en tomar el peso de las muestras antes de someterlas al agua normal. Las muestras se sumergen en agua durante 24 horas a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Después de la exposición durante 24 horas, se extraen las muestras del agua y se elimina toda la humedad de la superficie con un paño de algodón seco y limpio. Las muestras se vuelven a pesar en una balanza digital electrónica dentro de los 3 a 5 minutos posteriores a la extracción de las muestras del ambiente húmedo. El porcentaje de absorción de agua se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \times 100$$

3

Donde, m_i es la masa en kg después de la inmersión en agua durante 24 horas y m_f es la masa en kg antes de la inmersión en agua.

c). Ángulo de contacto

La humectabilidad de un material permite predecir el comportamiento que tendrá al estar en contacto con medios líquidos. Se puede determinar a partir de la medición del ángulo de contacto, que se define como el ángulo que forma un líquido al entrar en contacto con un sólido (Vogler, 1998).

Para éste análisis se utilizó un goniómetro de ángulo de contacto y el software imageJ para el procesamiento de datos. Se prepararon muestras de 50 mm x 50 mm x 10 mm de espesor. El

ángulo de contacto se determinó según la norma ASTM D5725, dejando caer una gota de 10 µL agua destilada en la superficie de la muestra, se toma la foto a tiempo cero a 23°C. Se tomaron mediciones en siete posiciones de cada muestra.

d). Resistencia a la flama Prueba UL-94

Se siguió la norma ASTM D3801 para determinar la velocidad de combustión de las probetas. Las muestras con dimensiones de 125 mm de largo por 13 mm de ancho con un espesor de 7 mm, se acondicionan durante 48 horas a 23°C. Se marcan a 25 mm y 100 mm, se sujetan verticalmente en el extremo más cercano a la marca de 100 mm. La probeta se mantiene en contacto con una flama de 20 mm de alto durante 2 intervalos de 10 segundos. Se mide el tiempo y la distancia que dure encendida la probeta o hasta que llegue a la marca de los 100 mm. La rapidez de quemado se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{d(\text{mm})}{t(\text{s})} \times 60 \quad 4$$

Donde, d es la distancia de quemado y t es el tiempo de quemado.

Se repitió el procedimiento de quemado descrito anteriormente tres veces.

e). Dureza Shore A

La dureza es la capacidad de un material de resistir a la penetración de un indentador. La dureza de las muestras se midió usando un Durómetro de escala Shore A (SHD) PosiTector a 23°C. Se emplearon muestras de 50 mm x 50mm x 10 mm de espesor. Las medidas se tomaron en 7 posiciones diferentes en cada muestra, con una separación de al menos 5 mm entre cada medición. Se reportó el promedio y la desviación estándar.

3.2.3 Análisis estadístico

Se empleó el sistema de análisis estadístico (SAS). Este software se emplea para el análisis y manejo de grandes cantidades de datos, su capacidad de organización ayuda a realizar una interpretación y visualización sobre conjuntos de datos para generar estadísticas, análisis y gráficos. Con un nivel de confianza de 95 %. Los resultados se presentan en gráficos de caja y bigote, también mediante asignación de letras a promedios para indicar si existe diferencia significativa entre compósitos (agrupación Duncan). Este análisis se realizó para las mediciones de absorción de agua, ángulo de contacto, dureza, tiempo de quemado y velocidad de quemado en los materiales compuestos.

3.2.4 Determinación de la asociación mediante técnicas instrumentales

La asociación entre los materiales al formar compósitos se investigó a través de Microscopia electrónica de barrido (MEB), Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y análisis Termogravimétricos (TGA).

a). Caracterización por MEB

Se utilizó microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (SEM, Jeal JSM-7600F) para analizar la microestructura de los compósitos preparados. Se empleó un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) y un análisis de mapeo de rayos X para observar la distribución de elementos en la superficie. Las determinaciones se realizaron en aumentos de 250, 500, 1000 y 20 000X.

Se evaluó la morfología de la superficie de la matriz pura (colofonia) y matriz reforzada. Se evaluó la dispersión de partículas en la colofonia y también la compatibilidad entre la colofonia y las partículas de biosílice. Se determinó el tamaño y la forma de las partículas de biosílice en las muestras con matriz reforzada.

b). Caracterización por FTIR

La espectroscopia infrarroja es una técnica que estudia las interacciones de la luz infrarroja con la materia y sirve para determinar los grupos funcionales presentes en la muestra analizada. Cuando las moléculas están en contacto con radiación infrarroja vibran, la vibración es característica de cada grupo funcional y se detecta en longitudes de onda específicas en el espectro. Un espectro infrarrojo es un gráfico de la medida de la intensidad de la luz infrarroja absorbida por el material vs el número de onda (Smith, 2011).

Los espectros infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) de las muestras se obtuvieron en un espectrómetro Tensor 27 Bruker, directamente por reflectancia total atenuada (ATR) con la región espectral de 4000-600 cm^{-1} utilizando una resolución de 4 cm^{-1} .

c). Caracterización por TGA

El análisis termogravimétrico (TGA) permite determinar los cambios en la masa de una muestra cuando esta se somete a un programa de temperatura en una atmosfera controlada. El equipo mide el peso inicial de la muestra a temperatura ambiente y registra de forma continua el cambio de peso de la muestra mientras se desarrolla el programa de temperatura. El resultado del análisis es una curva termogravimetrica que se puede presentar en forma integral (TG) o de forma diferencial (DTG) (Prime et al., 2009).

El análisis térmico se llevó a cabo utilizando un equipo Netzsch STA 449-F3 Jupiter. La muestra se colocó en un crisol de aluminio con una rampa de calentamiento de 10°C/min de 28 hasta 600°C a flujo de 20 ml/min de N_2 de ultra alta pureza.

d). Caracterización por DRX

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica que usa la interacción de un haz de rayos X con el material de prueba para determinar su estructura atómica, parámetros cristalográficos y así revela patrones únicos que son una huella digital única para cada material. Es una técnica de caracterización estructural no destructiva.

La difracción de rayos X se realizó en un equipo Advance Davinci modelo D8, en el rango de $2\theta=5-50^\circ$ en pasos de $2^\circ/\text{min}$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Obtención de biosílice a partir de la cáscara de arroz

La Tabla 1 indica los valores estadísticos de la obtención de biosílice a partir de la cáscara de arroz empleando 6 muestras, las cuales dan una media aritmética de 20.82 % del porcentaje de peso en peso (%p/p) de biosílice. Al comparar este resultado de biosílice con lo reportado por otros autores como: Bakar 16%, Requena 17% y Xue 20%p/p, (Requena et al., 2019; Xue et al., 2019; Bakar et al., 2016) se establece que la cantidad de biosílice obtenida en el presente trabajo es ligeramente superior 4 %p/p, lo que indica que hubo una buena reproducibilidad del método empleado.

Tabla 1. Datos estadísticos de la obtención de biosílice.

Muestra	CA (g)	Biosílice (g)	Biosílice (%p/p)
1	3.62	0.73	20.23
2	3.61	0.75	20.89
3	3.69	0.78	21.08
4	3.68	0.75	20.40
5	3.69	0.78	21.18
6	3.54	0.75	21.12
Estadística descriptiva			
Media aritmética:			20.82
Desviación estándar:			00.40
Varianza:			00.16

Se obtuvo una biosílice amorfa de alta pureza a partir de la cáscara de arroz mediante lixiviación con ácido clorhídrico, seguido de una combustión controlada a 600°C durante 2h. La biosílice obtenida bajo estas condiciones tiene una aplicación potencial como relleno en plásticos y compuestos de caucho (Bakar et al., 2016).

4.2 Caracterización de biosílice y de cáscara de arroz

4.2.1. Análisis visual de cáscara de arroz y su biosílice

El color de la biosílice que se obtuvo es blanco como se aprecia en la Figura 16c. El porcentaje y color son consistentes con lo reportado por Rahmaniar & Susanto (2019) y correspondiente a las condiciones empleadas en el proceso de obtención; partiendo de la cáscara de arroz (16a), posteriormente harina de cáscara de arroz (16b).



Figura 16. Comparación de los tres materiales CA (a), HCA (b) y biosílice (c).

4.2.2 MEB de la biosílice

En la Figura 17a se observa que la morfología de la biosílice obtenida de la CA es irregular con un tamaño de la partícula de 1 a 50 μm . La Figura 17b muestra que a su vez las partículas de la biosílice están conformadas de nanopartículas esféricas, formando aglomerados (Amutha et al., 2010). La presencia de estas partículas esféricas de tamaño nanométrico conduce a una estructura altamente porosa con una distribución de partículas homogénea. La Figura 17c a través del perfil del espectro de dispersión de energía indican la presencia predominantemente de elementos como el Si en las partículas de biosílice.

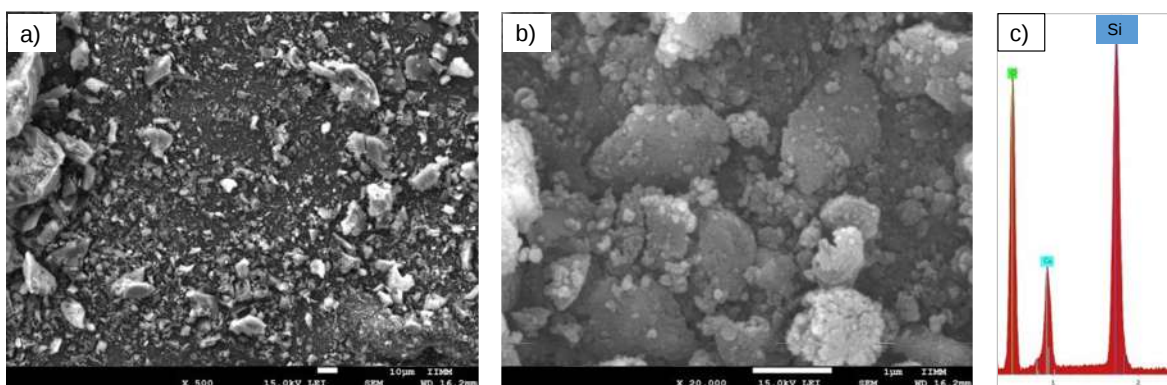


Figura 17. Micrografías de biosílice a) 500x, b) 20 000x y c) EDS de las superficies.

4.2.3. FTIR de cáscara de arroz y su biosílíce

En la Figura 18a, 18b y 18c se exponen los espectros IR de la cáscara de arroz, cáscara de arroz pretratada y biosílíce, respectivamente. En la Figura 18a se observa una señal ancha a 3336 cm^{-1} que corresponde a los grupos -OH aportados por la fracción orgánica y que corresponden a las vibraciones de estiramiento en la molécula de celulosa, la cual representa el mayor porcentaje de la composición de CA, también se aprecia una señal a 1590 cm^{-1} que corresponde al grupo acetilo (C-O-CH_3), relacionados a la estructura de la lignina (Requena et al., 2019), adicionalmente existe un doblete a 1040 y 800 cm^{-1} de mayor y menor intensidad correspondientes a la O-Si-O por sus estiramientos de enlaces asimétrico y simétrico respectivamente.

En la Figura 18b se observan las señales a 3336 cm^{-1} y a 1590 cm^{-1} (-OH , C-O-CH_3) con una menor intensidad con respecto a la CA natural, debido a que el pretratamiento con HCl ayuda a romper la estructura del tejido y a liberar los diferentes componentes amorfo (Requena et al., 2019), las señales a 1040 y 800 cm^{-1} correspondientes a Si-O-Si presentan una intensidad media.

En la Figura 18c no se observan las señales a 3336 cm^{-1} y a 1590 cm^{-1} (-OH , C-O-CH_3), en contraste se observan las señales a 1040 y 800 cm^{-1} intensificadas, con lo anterior se evidencia la eliminación de la mayor cantidad del material orgánico y la presencia de biosílíce.

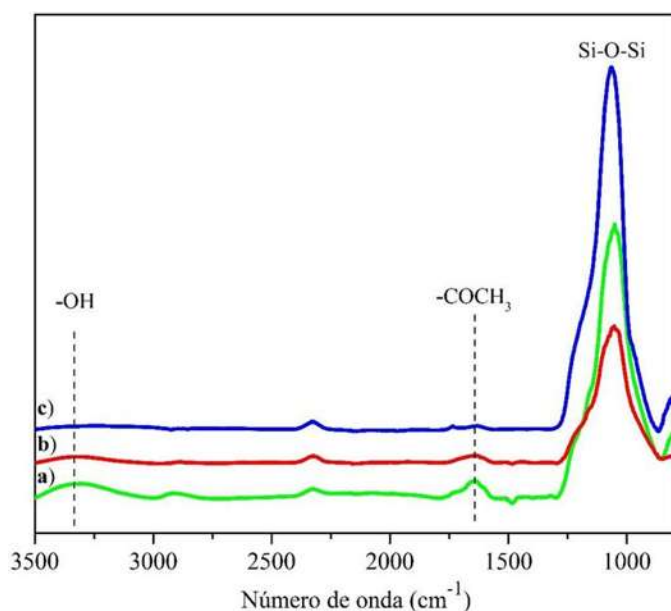


Figura 18. Espectro infrarrojo comparativo de a) CA, b) CA pretratada y c) biosílice.

Se obtuvo una biosílice amorfa de alta pureza a partir de la cáscara de arroz mediante lixiviación con ácido clorhídrico, seguido de una combustión controlada a 600°C durante 2h. La biosílice obtenida bajo estas condiciones tiene una aplicación potencial como relleno en plásticos y compuestos de caucho (Bakar et al., 2016).

4.2.4 DRX de la cáscara de arroz y su biosílice

En la Figura 19a y 19b se muestran los patrones de difracción de rayos X de polvo de biosílice y CA respectivamente. En la Figura 19a se observa un pico ancho difuso que oscila entre 15 y 30° indicando una estructura desordenada, con intensidad máxima en $2\theta = 22^\circ$, lo que confirma la naturaleza amorfa de la biosílice (Bakar et al., 2016). En la Figura 19b se observan los picos cristalinos típicos de la celulosa (2θ : 15–16°, 22° y 34°) según lo informado por Collazo-Bigliardi et al. (2018), la celulosa representa el mayor porcentaje de la composición de la cáscara de arroz.

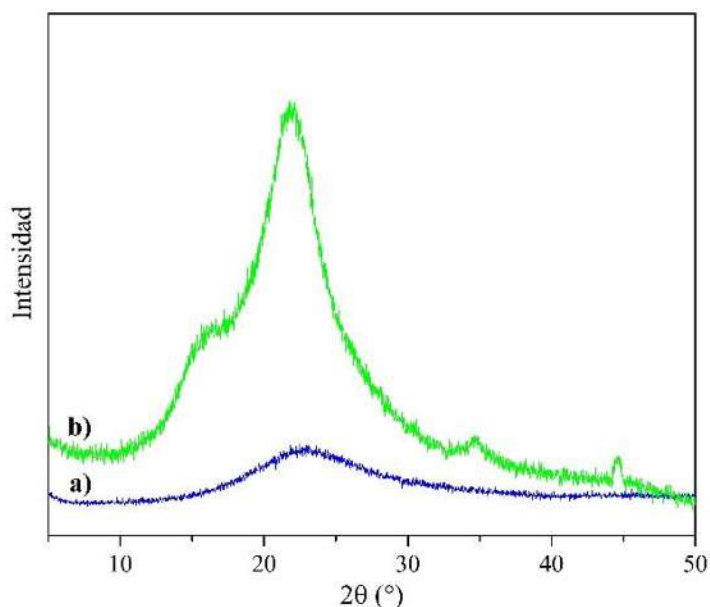


Figura 19. Patrones de difracción de rayos X de a) biosílice y b) CA.

4.3 Obtención de colofonia hidroxilada

En la Figura 20 se ilustra el análisis por FTIR de colofonia hidroxilada, a) y colofonia, b). En el espectro a) se observa una señal ancha a 3420 cm^{-1} asignada a grupos hidroxilos presentes en la colofonia hidroxilada, también se aprecian las dos señales características de la colofonia, un pico en el intervalo de $2900\text{ a }3000\text{ cm}^{-1}$ que corresponde a una vibración de tensión C-H, la señal a 1690 cm^{-1} es una frecuencia característica del grupo C=O y resulta de las vibraciones de flexión de la molécula, se ve una señal a 1384 cm^{-1} correspondiente a una señal secundaria de grupos OH.

En el espectro infrarrojo b) no se aprecia la señal correspondiente a los grupos hidroxilo, la señal secundaria para grupos OH a 1384 cm^{-1} presenta una intensidad menor, indicando que la colofonia presenta moléculas polares. Con base en los notables picos de absorción a 3420 cm^{-1} y 1384 cm^{-1} correspondientes a señales de grupos OH, es posible determinar que se logró la hidroxilación de colofonia mediante el proceso de una reacción ácida (Brocas et al., 2014).

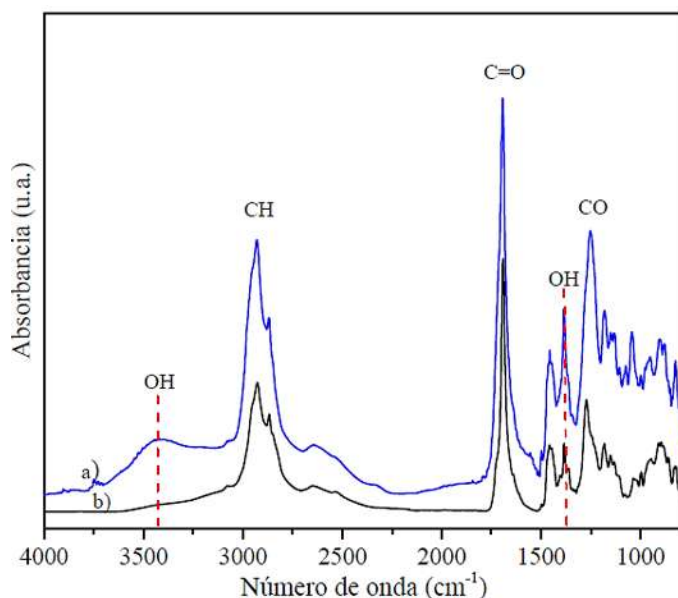


Figura 20. Espectro infrarrojo comparativo de a) colofonia hidroxilada y b) colofonia.

4.4 Caracterización de los materiales compuestos

4.4.1 Análisis visual de los materiales compuestos

a). Colofonia-Biosílice

La Figura 21 muestra los materiales compuestos a partir de colofonia-biosílice. Todos los materiales compuestos son homogéneos, presentan brillo y sin fisuras aparentes. Zhu et al. (2021) reportan que sus compósitos a base de colofonia-polvo de bambú son homogéneos. La transparencia disminuye al incrementarse la concentración de la biosílice; así la muestra CB0, con mayor concentración de colofonia (100%) es más transparente que la CB20, que contiene el menor contenido de colofonia (80%). Esto concuerda con otros trabajos que indican que al mezclar la colofonia con otro material se genera una disminución gradual en la transparencia; así lo mencionan Aldas et al. (2021).



Figura 21. Material compuesto CB.

b). Colofonia hidroxilada-Biosílice

La Figura 22 muestra que los materiales compuestos formados por la mezcla de colofonia hidroxilada y biosílice son homogéneos, presentan brillo y sin fisuras aparentes. A mayor concentración de colofonia hidroxilada el material es moldeable y con una textura suave, es decir, ChxB5 y ChxB10 son moldeables parecidos a la plastilina, a partir de ChxB15 y ChxB20 el material se torna más duro, ya no es tan fácil de moldear.

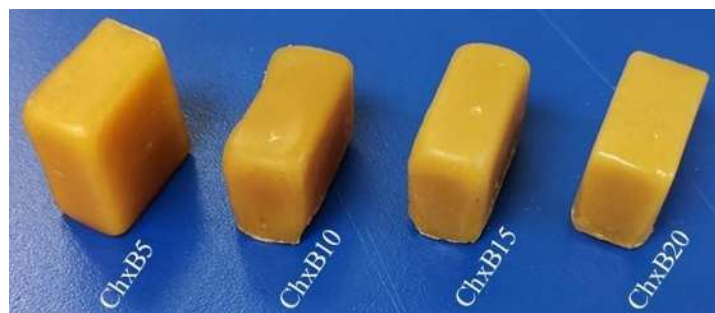


Figura 22. Material compuesto ChxB.

c). Colofonia-Biosílice hidroxilada

La Figura 23 muestra que los materiales compuestos formados por la mezcla de colofonia y biosílice hidroxilada son homogéneos, presentan brillo y sin fisuras aparentes. Estos materiales presentan una mayor resequedad comparados con CB5-20. Pareciera que existe una mayor contracción durante el tiempo de secado (7 días) en CBhx15 y CBhx20, esto se puede observar en la superficie de estos dos últimos materiales.

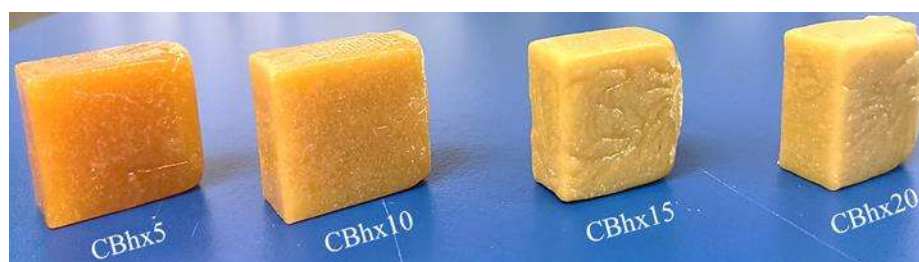


Figura 23. Material compuesto CBhx.

4.4.2. Densidad de los materiales compuestos

a). Densidad de Colofonia-Biosílice

En la Figura 24 se ilustran los valores de densidad para CB. La densidad de CB0 es de 0.99 g/cm³, en CB5 es de 1.00 g/cm³, en CB10 es de 1.06 g/cm³, en CB15 es de 1.07 g/cm³ y para CB20 1.09 g/cm³. La densidad tiene un aumento progresivo al incrementar el contenido de biosílice. Lo

que destaca la incorporación efectiva de biosílice, que pudo dispersarse uniformemente en la colofonia, aumentando así su densidad intrínseca.

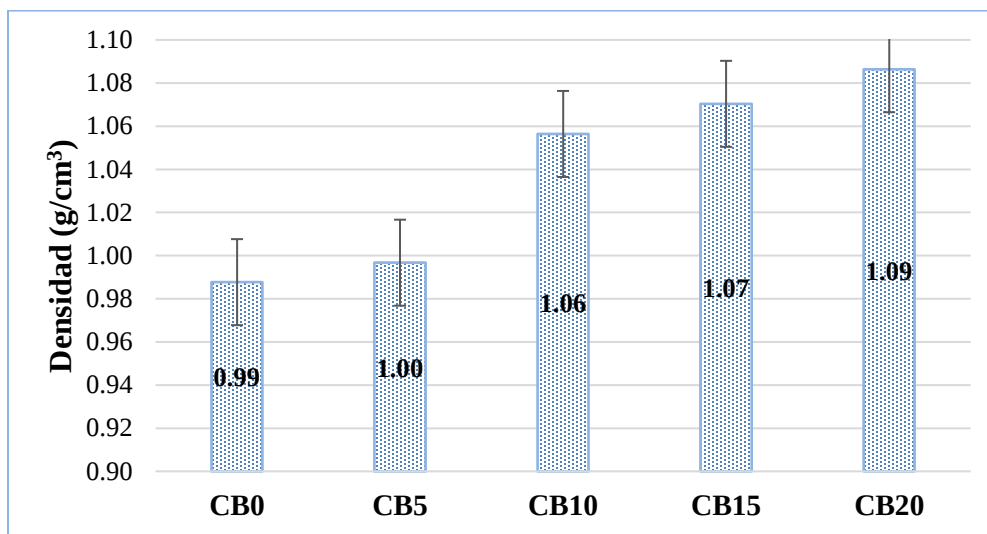


Figura 24. Densidad de los materiales CB0-CB20.

b). Densidad de Colofonia hidroxilada-Biosílice

En la Figura 25 se ilustran los valores de densidad para colofonia hidroxilada y biosílice. La densidad para ChxB5 es de 0.98 g/cm³, para ChxB10 es de 1.13 g/cm³, para ChxB15 es de 1.17 g/cm³ y para ChxB20 de 1.08 g/cm³. Estos materiales muestran una tendencia similar a los materiales CB, lo que nos indica que la biosílice se dispersó de manera uniforme en la colofonia hidroxilada, generando un aumento en su densidad y asimismo en la dureza.

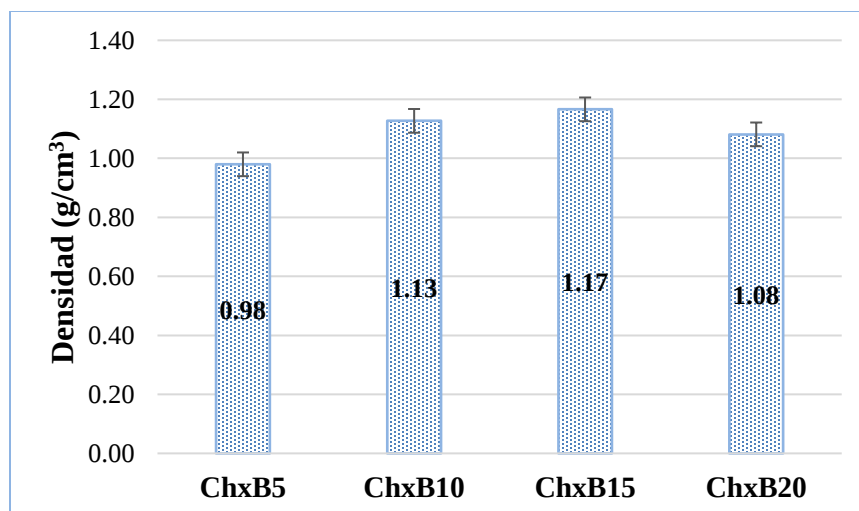


Figura 25. Densidad de los materiales ChxB5-ChxB20.

c). Densidad de Colofonia-Biosílice hidroxilada

En la Figura 26 se ilustran los valores de densidad para colofonia y biosílice hidroxilada. La densidad para CBhx5 es de 1.00 g/cm³, para CBhx10 es de 1.01 g/cm³, para CBhx15 es de 1.02 g/cm³ y para CBhx20 es de 1.05 g/cm³. Estos materiales muestran la misma tendencia que los materiales CB, lo que indica que la biosílice se esparció de forma homogénea en la colofonia hidroxilada. Se aprecia un incremento gradual en la densidad del compuesto a medida que aumenta el contenido de biosílice.

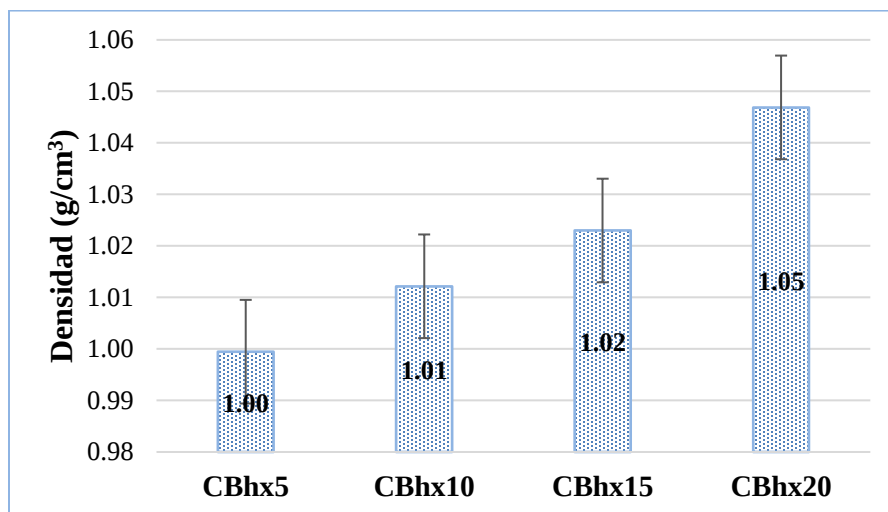


Figura 26. Densidad de los materiales CBhx5-CBhx20.

Los valores de densidad indican que al incrementar el contenido de biosílice, los materiales CB y CBhx incrementan su densidad con respecto a colofonia pura. En el material ChxB el contenido más alto de biosílice disminuye su densidad, lo que sugiere que hay menos huecos porque el sistema esta cercano a la saturación. Al comparar la densidad con la dureza de los compósitos se observa una relación estrecha, es decir, a mayor densidad mayor dureza.

4.4.3 Absorción de agua de los materiales compuestos

a). Absorción de agua de Colofonia-Biosílice

En la Figura 27 se ilustra el porcentaje de absorción de agua de CB durante 24. CB0 presenta una absorción de 0.06 %, CB5 absorbe 0.05 %, mientras que, CB10, CB15 y CB20 presentan una absorción de agua por debajo de 0.04 %. Estos materiales presentan una tendencia a disminuir la absorción de agua a medida que incrementa el contenido de biosílice en el compósito. Esta disminución se atribuye a la densidad relativamente mayor y en su mayoría al caracter hidrofobo de la colofonia (Mahendra, 2019).

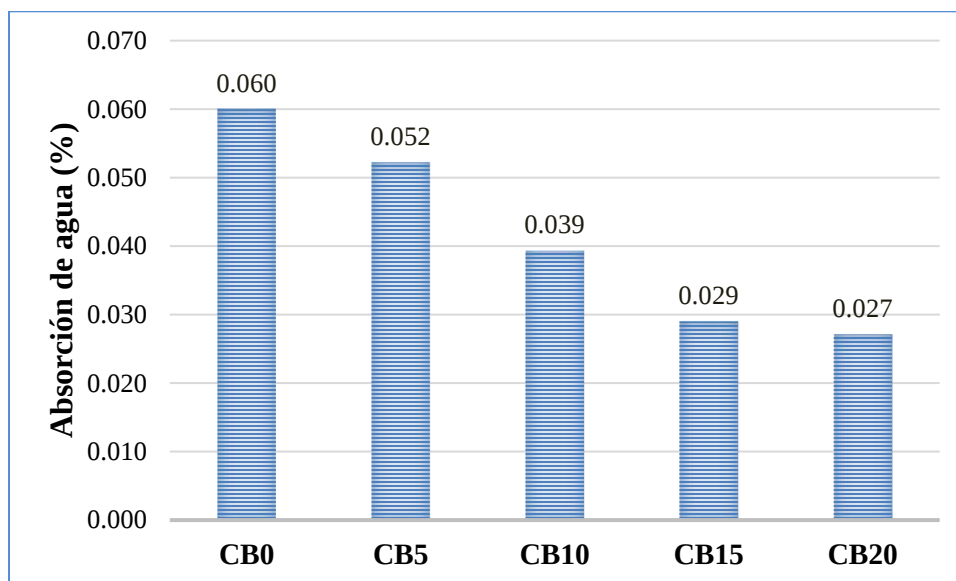


Figura 27. Absorción de agua de los materiales CB0-CB20.

b). Absorción de agua de Colofonia hidroxilada-Biosílice

En la Figura 28 se muestra el porcentaje de absorción de agua de los materiales ChxB durante 24 h. La absorción de agua en ChxB5 es de 0.62 %, para ChxB10 es de 0.49 %, en ChxB15 de 0.41 % y en ChxB20 de 0.23 %. Los compósitos tienden a disminuir su absorción de agua a medida que aumenta el contenido de biosílice en el compósito. Esta disminución gradual, sugiere la saturación de los sitios de unión disponibles dentro de la matriz. Por lo que se destaca la importancia de la biosílice en la reducción de la absorción de agua.

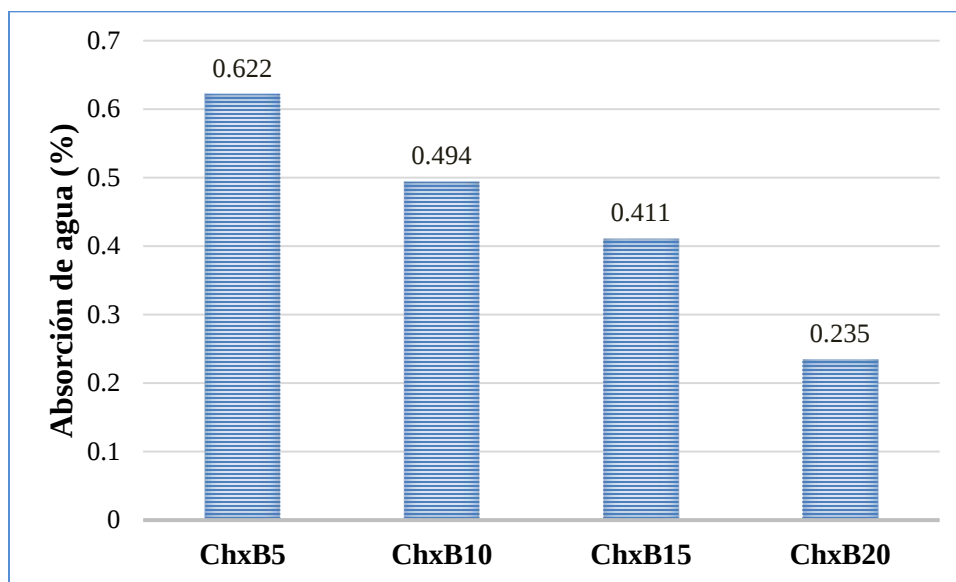


Figura 28. Absorción de agua de los materiales ChxB5-ChxB20.

c). Absorción de agua de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada

La Figura 29 representa el porcentaje de absorción de agua de los materiales CBhx durante 24 h. La absorción de agua en CBhx5 es de 0.08 %, en CBhx10 de 0.11 %, en CBhx15 de 0.16 % y en CBhx20 de 0.18 %. Los compósitos absorben muy poca agua, por debajo del 0.50 %. La tendencia en estos materiales es opuesta a CB y ChxB, es decir, a medida que incrementa el contenido de biosílice hidroxilada la absorción de agua aumenta. Esto se debe a que la biosílice hidroxilada, podría provocar la atracción de moléculas de agua.

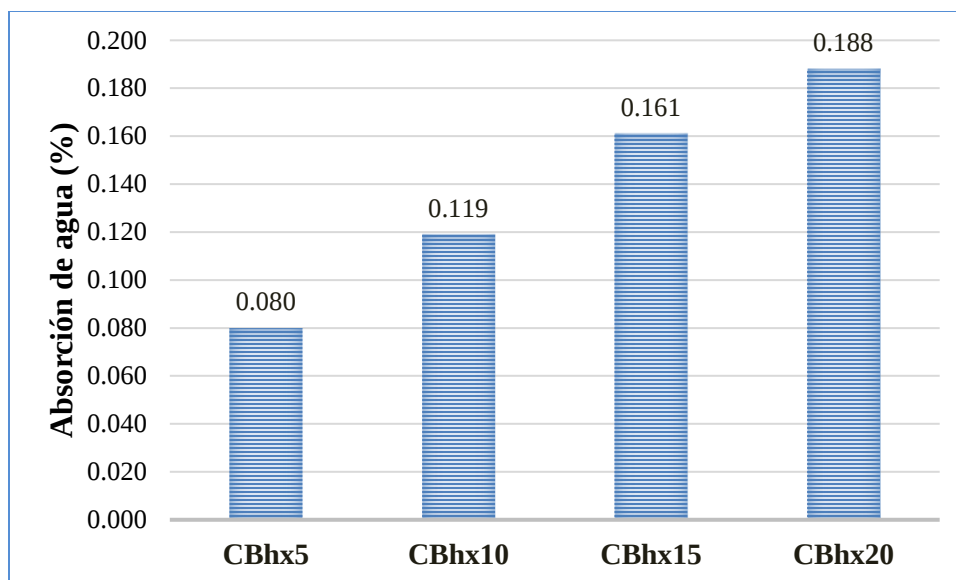


Figura 29. Absorción de agua de los materiales CBhx5-CBhx20.

La absorción de agua en todos los materiales se encuentra por debajo del 1.00 %. Lo que permite deducir que los materiales obtenidos conservan su propiedad de hidrofobicidad, aún con las modificaciones químicas realizadas a colofonia y biosílice. En este sentido, estos compósitos son idóneos para aplicaciones en las que se requiera una alta resistencia a la humedad y estabilidad dimensional.

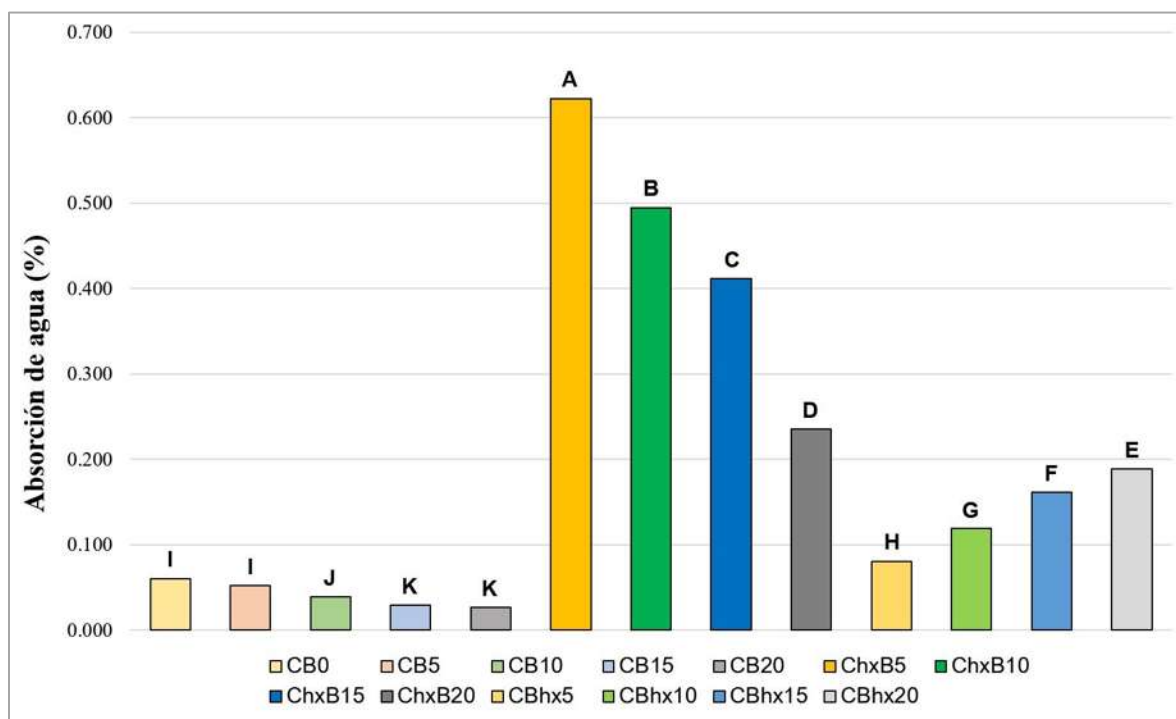
d). Análisis estadístico de la absorción de agua en los materiales compuestos

En la Figura 30 se muestra el análisis estadístico para los materiales CB, ChxB y CBhx. En los materiales formados a partir de colofonia y biosílice se aprecia que no existe diferencia significativa entre CB0 y CB5 en cuanto a la cantidad de agua que absorben, pero si existe diferencia de estos dos materiales respecto a CB10 que absorbe menos agua. Se observa que no existe diferencia entre CB15 y CB20 en su capacidad para absorber agua. Por lo anterior, CB10 y CB15 son los que modifican la cantidad de absorción de agua, absorbiendo menos que la colofonia pura (CB0).

En cuanto a ChxB todos los compósitos presentan diferencia significativa respecto a la cantidad de colofonia hidroxilada empleada y su relación con la capacidad de absorción de agua,

la tendencia es clara, la absorción de agua es menor a medida que disminuye la cantidad de colofonia hidroxilada, resaltando una notable diferencia entre ChxB5 y ChxB20.

Todos los compósitos de colofonia y biosílice hidroxilada son diferentes estadísticamente en su capacidad para absorber agua, tienden a incrementar su capacidad de absorción de agua a medida que incrementa la cantidad de biosílice hidroxilada, así, la diferencia más notable se presenta entre CBhx5 y CBhx20.



**Promedios con la misma letra no son estadísticamente significativos.*

Figura 30. Gráficos de análisis estadístico en SAS para CB, ChxB y CBhx.

De acuerdo al análisis estadístico se puede deducir que CB, ChxB y CBhx son diferentes, su capacidad de absorción de agua se ve modificada dependiendo de los componentes que conforman el compósito. En CB se identificó que la absorción de agua también se ve modificada por la cantidad de los componentes empleados, encontrando diferencias significativas solo entre CB0, CB10 y CB15.

4.4.4 Ángulo de contacto de los materiales compuestos

a). Ángulo de contacto de los materiales Colofonia-Biosílice

En la Figura 31 se ilustra el valor del ángulo de contacto a tiempo cero para los materiales compuestos colofonia y biosílice. La gota de agua sobre la colofonia formó un ángulo de 58° ya que la colofonia es insoluble en agua, pero más allá de esto, posee hidroxilos y ésteres, que son atractores de moléculas polares reduciendo su ángulo de contacto, resultados similares fueron reportados por Aldas et al. (2021). Así, el ángulo que formó la gota de agua con las superficies de CB5, CB10, CB15 y CB20 fue de 56.5 , 55.2 , 55° y 54.3° respectivamente. El aumento de la hidrofiliicidad está relacionado con los grupos Si-OH en la superficie de la colofonia (Chen et al., 2018). Esto indica que al incrementar el contenido de biosílice la humectabilidad de la superficie incrementa.

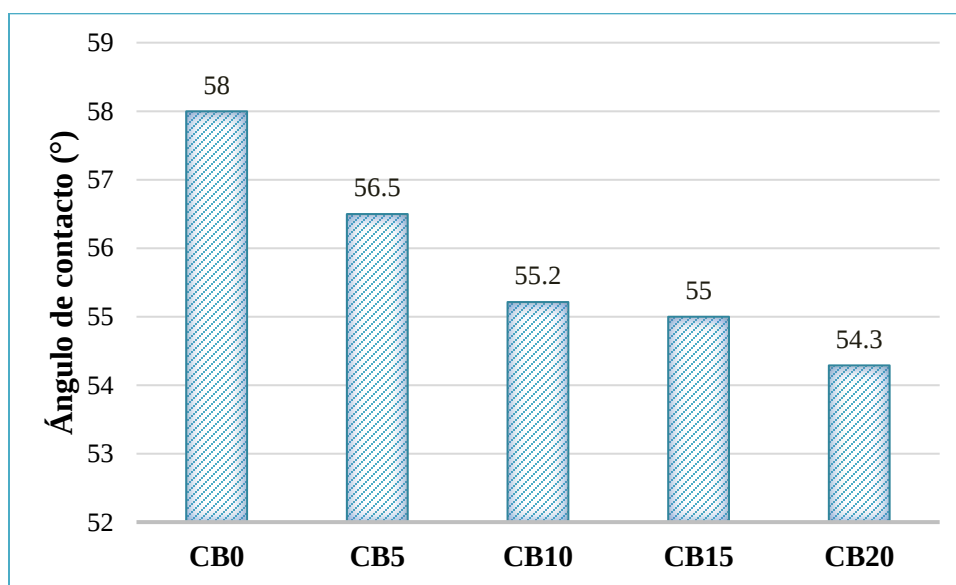


Figura 31. Ángulo de contacto de los materiales CB0-CB20.

b). Ángulo de contacto de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada

En la Figura 32 se ilustra el valor del ángulo de contacto a tiempo cero para colofonia y biosílice hidroxilada. El ángulo que formó la gota de agua con las superficies de CBhx5, CBhx10, CBhx15 y CBhx20 fue de 54.0 , 53.1 , 52.2° y 51.5° respectivamente. Los valores de los ángulos de contacto disminuyen, indicando que al incrementar el contenido de biosílice hidroxilada en los

materiales compuestos, la humectabilidad superficial incrementa. Debido a un incremento en los grupos Si-OH, lo que concuerda con el análisis por FTIR (Figura 48).

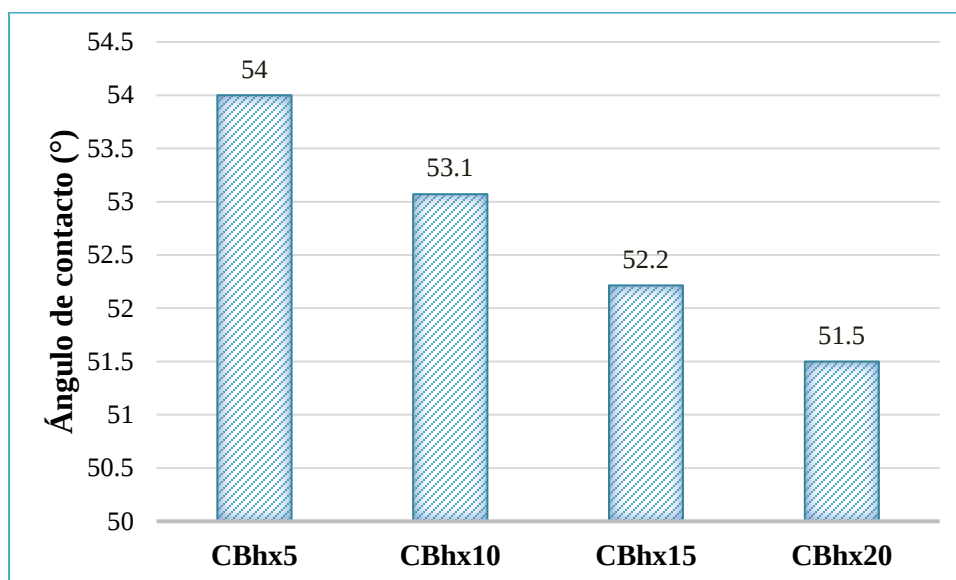
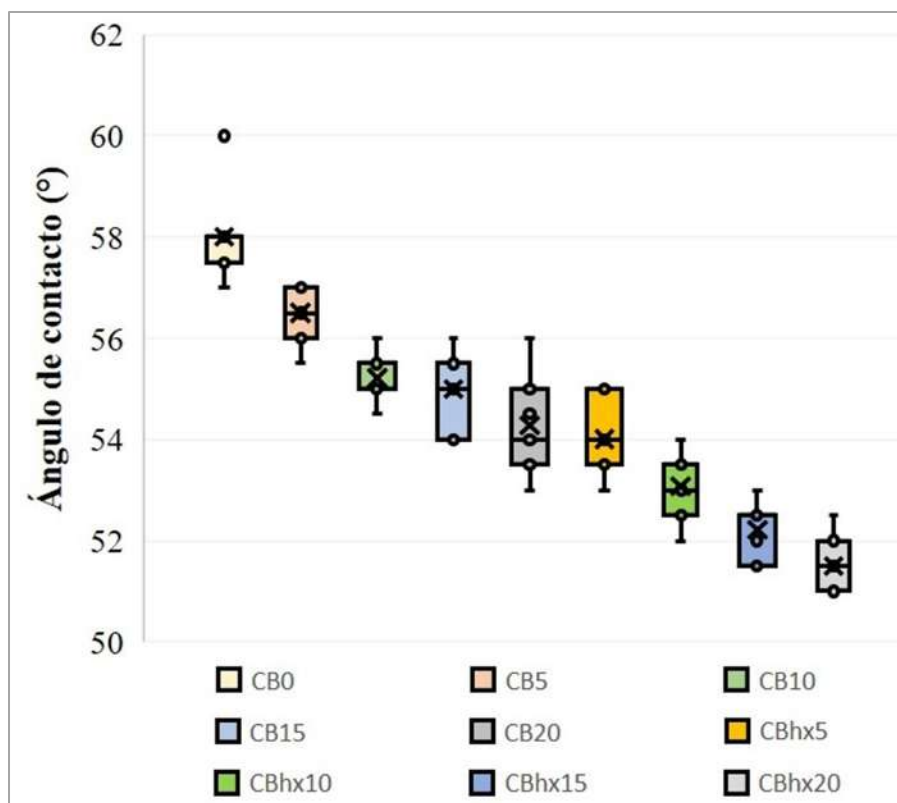


Figura 32. Ángulo de contacto de los materiales CBhx5-CBhx20.

c). Análisis estadístico del ángulo de contacto en los materiales compuestos

La Figura 33 muestra el análisis estadístico de CB y ChxB. El ángulo de contacto es un parámetro que permite conocer la humectabilidad superficial de un material. Así, se puede observar que el mayor ángulo de contacto lo presenta CB0, la presencia de un valor atípico en el compósito pudo ser por un error de medición. Los amplios rangos de cuartiles en el ángulo de contacto de CB15, CB20 y ChxB5 indican una mayor variabilidad, debido al incremento de biosílice en CB15, CB20 y a la modificación química de la matriz en ChxB5. Asimismo, CB10, CB20 y ChxB10 muestran una dispersión considerable, lo que refleja diferencias significativas en la humectabilidad superficial de los compósitos. Mediante este análisis se observó que el ángulo de contacto en los compósitos se ve modificado por la cantidad de biosílice empleada y también por el tipo de matriz utilizada.



*Promedios con la misma letra no son estadísticamente significativos.

Figura 33. Gráficos de caja y bigote para CB y CBhx.

4.4.5 Resistencia a la flama de los materiales Colofonia-Biosílice

a). Rendimiento de la inflamabilidad de CB

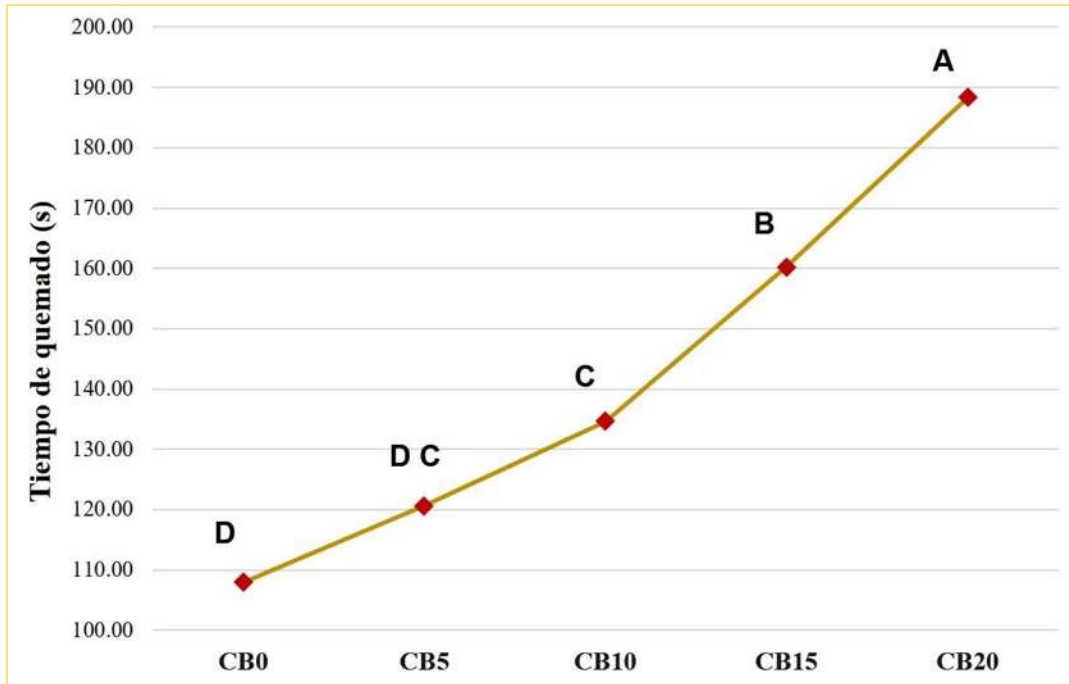
Se determinó el tiempo y la velocidad de quemado en función de las concentraciones de biosílice en la matriz de colofonia. Los resultados se muestran en la Figura 34. La colofonia pura es una sustancia inflamable con una velocidad de combustión de aproximadamente 56 mm/s. Cuando se adiciona un 20% de biosílice (CB20), la velocidad de combustión disminuye a 31.86 mm/s, lo que representa una disminución aproximadamente del 50% en la velocidad de quemado. La diferencia en el tiempo de quemado entre CB0 y CB20 es de 80 s, lo que indica que el proceso de combustión fue retardado. Estas mejoras se debieron al efecto sinérgico entre la colofonia y las partículas de biosílice, que jugaron un papel fundamental para suprimir la liberación de calor durante el proceso de combustión (Moustafa, 2022).



Figura 34. Resistencia a la flama de CB0-CB20.

b). Análisis estadístico del tiempo de quemado de Colofonia-Biosílice

En la Figura 36, se muestra el gráfico del análisis estadístico del tiempo de quemado en CB. Se observa que existe diferencia significativa entre CB0 y CB10, CB15, CB20. La colofonia tarda más tiempo en quemarse al agregarle biosílice. No se encontró diferencia significativa entre CB0 y CB5. No hay diferencia significativa entre CB5 y CB10, es decir, el agregar 5 % o 10 % de biosílice genera el mismo efecto en cuanto al tiempo de quemado. Por lo que, el contenido de biosílice en la colofonia a partir del 10% tiene un efecto significativo en el aumento del tiempo de quemado, es decir, el proceso a combustión se retarda en CB10, CB15 y CB20.

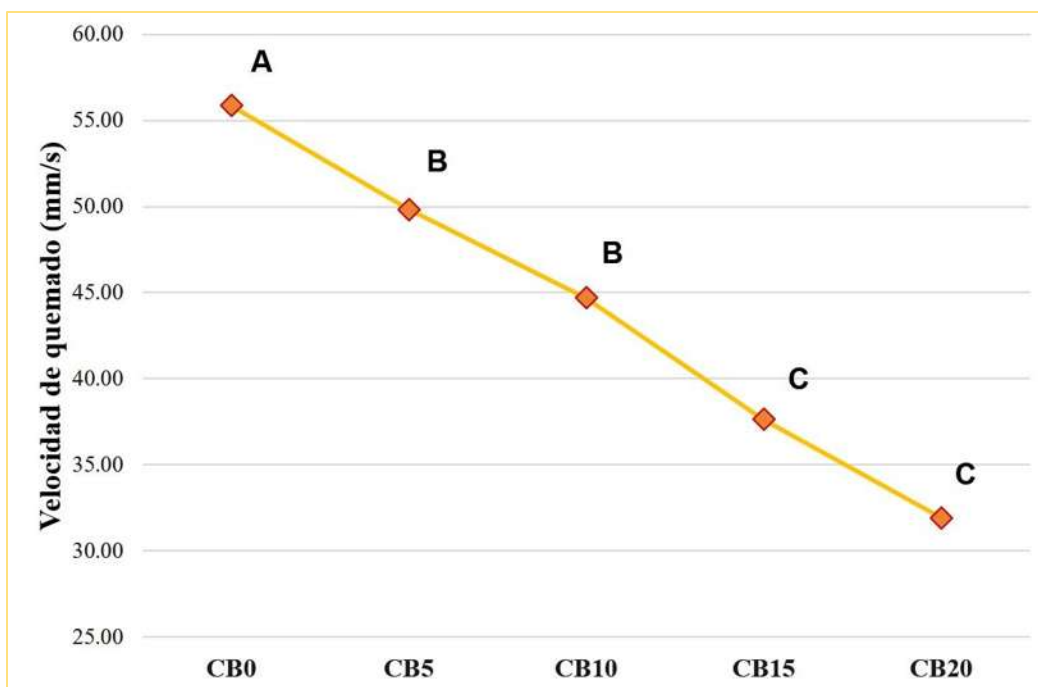


**Promedios con la misma letra no son estadísticamente significativos.*

Figura 35. Gráficos de análisis estadístico en SAS para CB0-CB20.

c). Análisis estadístico de la velocidad de quemado de Colofonia-Biosílice

En la Figura 36, se muestra el gráfico del análisis estadístico, donde se determinó que existe diferencia significativa entre CB0 y los compósitos con biosílice, es decir, que la colofonia disminuye su velocidad de combustión al agregarle biosílice. No se encontró diferencia significativa entre CB5 y CB10, es decir, el agregar 5 % o 10 % de biosílice genera el mismo efecto en cuanto a la velocidad de quemado. Asimismo, entre CB15 y CB20 no hay diferencia significativa, al agregar 15 % o 20 % de biosílice se obtiene el mismo efecto en cuanto a la velocidad de quemado. Si el compósito se empleara en condiciones donde la prioridad fuera la velocidad de quemado, lo ideal sería utilizar CB5 y CB15; se obtendría un ahorro de biosílice significativo, que finalmente se traduce a costos en un sistema de producción determinado.



**Promedios con la misma letra no son estadísticamente significativos.*

Figura 36. Gráficos de análisis estadístico en SAS para CB0-CB20.

4.4.6 Dureza Shore A de los materiales compuestos

a). Dureza shore de los materiales Colofonia-Biosílice

En la Figura 37 se muestran los valores de dureza shore A para los materiales colofonia y biosílice, donde el aumento en la dureza de 96.8 a 98.3 indica que la biosílice mejora la dureza (mayormente con 20%). Otros trabajos reportan que mejoran las interacciones matriz-relleno, cuando las partículas de relleno se humedecen; ya que la mayoría de los polímeros son hidrófobos (con grupos apolares), muy viscosos y no humedecen eficazmente al relleno (Ayswarya et al., 2012). En este caso, la mejora en la dureza de la colofonia indica que existe una asociación importante colofonia-sílice debido a los enlaces de la colofonia CO-O, OH, COOH que interaccionan con la fracción de la sílice, Si-O-Si.

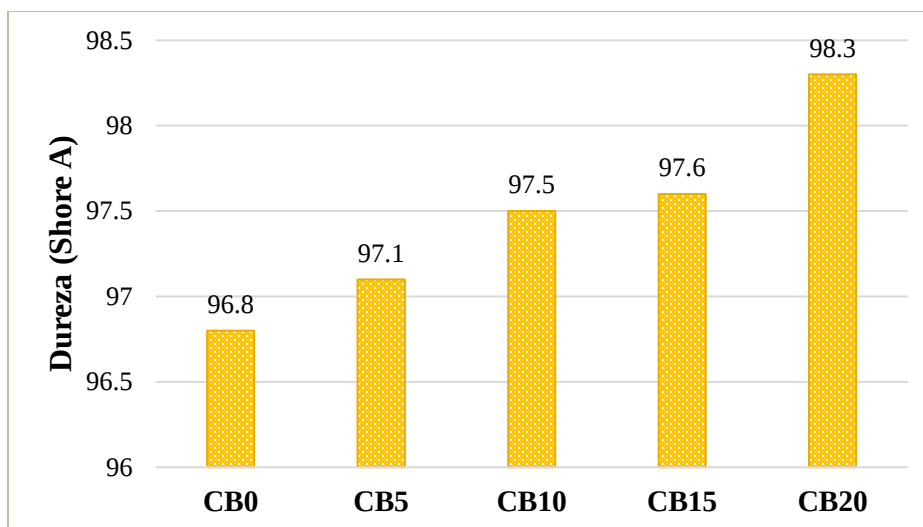


Figura 37. Dureza shore de los materiales CB0-CB20.

b). Dureza shore de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice

El material es suave, por lo cual la sonda del durómetro empleada para la determinación de materiales suaves (tipo “A”) detectó valores por debajo de lo que se considera confiable. Para ChxB5 la dureza fue de 6, para ChxB10 la dureza de 7 y para ChxB15 la dureza de 12. Finalmente para ChxB20 si se pudo determinar el valor de dureza, ya que este material compuesto es más duro que los 3 anteriores, reportando un valor de dureza de 95.6.

c). Dureza shore de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada

En la Figura 38 se muestran los valores de dureza shore A para los materiales colofonia y biosílice hidroxilada, donde el aumento en la dureza de 97.2 a 98.1 indica que la biosílice mejora la dureza (mayormente con 20%). En este caso, la mejora en la dureza de la colofonia indica que existe una asociación importante colofonia-biosílice. Prácticamente presenta la misma tendencia en valores de dureza que el material CB.

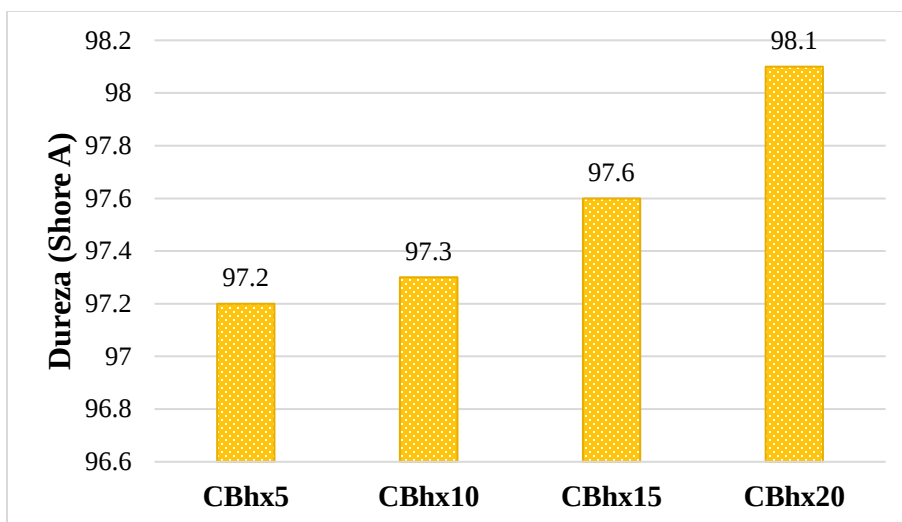
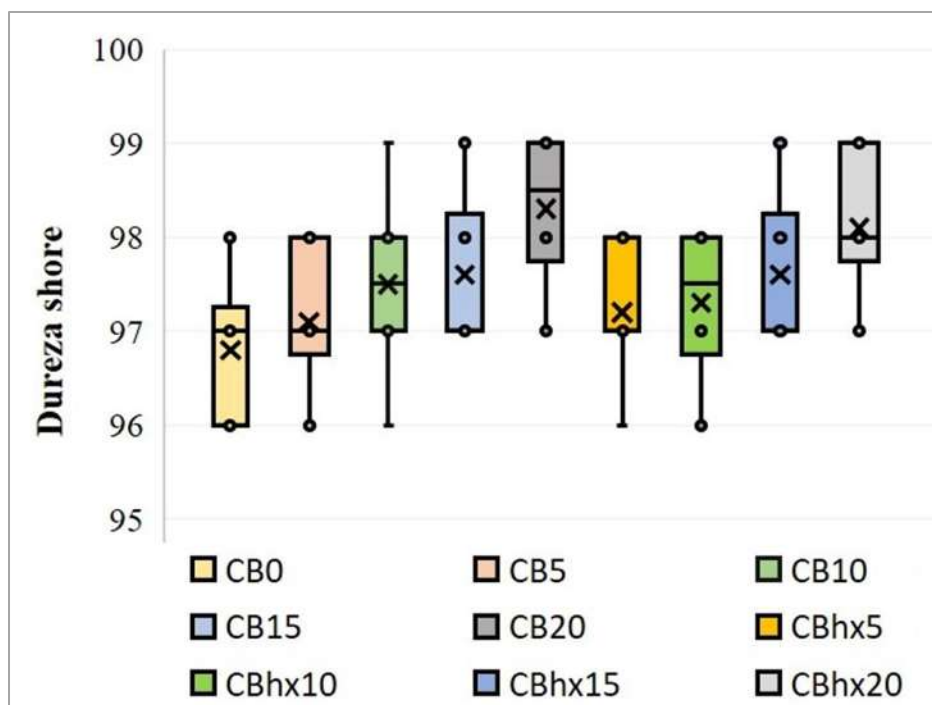


Figura 38. Dureza shore A de los materiales CBhx5-CBhx20.

d). Análisis estadístico de la dureza de los materiales compuestos

En la Figura 39 se muestra el análisis estadístico de dureza en CB, ChxB y CBhx. La dureza mide la resistencia que opone un material a ser penetrado por un indentador. Se puede observar que CB20 y CBhx20 presentan los valores más altos de dureza. Los amplios rangos de cuartiles en los compósitos indican variabilidad, causado por el efecto de biosílice empleado en diferentes proporciones y a la modificación química de la matriz en ChxB.



*Promedios con la misma letra no son estadísticamente significativos.

Figura 39. Gráficos de caja y bigote para CB y CBhx.

4.4.7. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de los compósitos

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de CB, ChxB y CBhx.

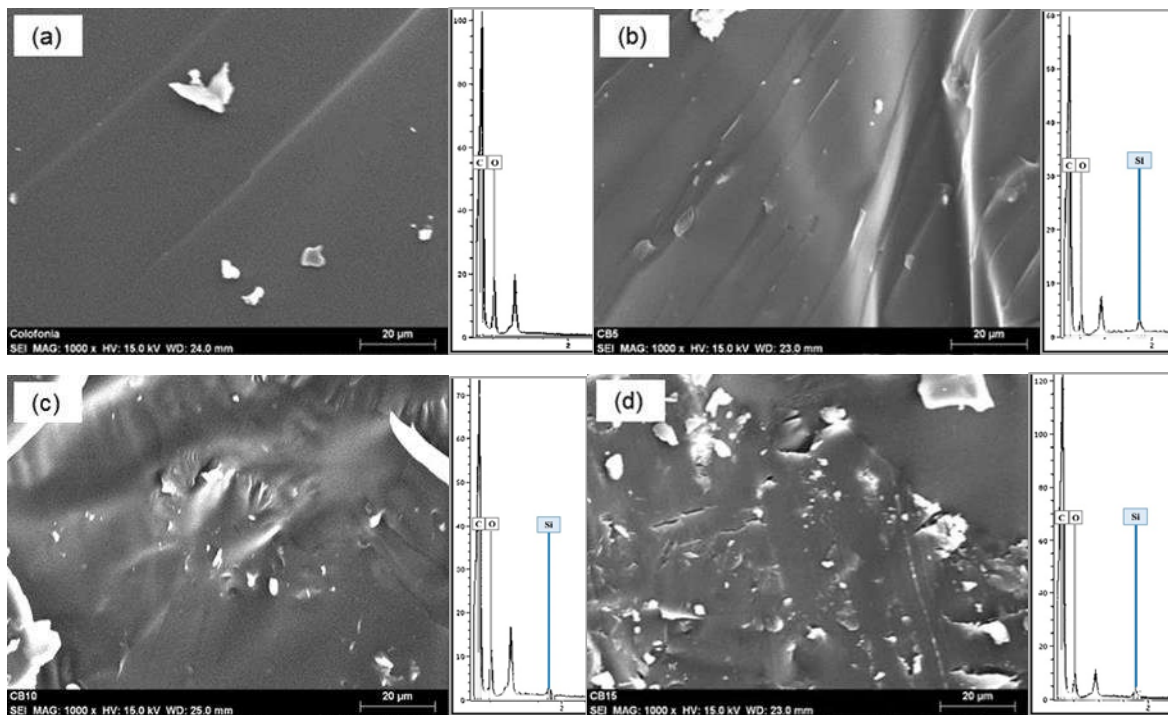
Compósito	Densidad (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Ángulo de contacto (°)	Dureza (shore A)
CB0	0.99	0.060	58	96.8
CB5	1.00	0.052	56.5	97.1
CB10	1.06	0.039	55.2	97.5
CB15	1.07	0.029	55	97.6
CB20	1.09	0.027	54.3	98.3
ChxB5	0.98	0.622	---	---
ChxB10	1.13	0.494	---	---
ChxB15	1.17	0.411	---	---
ChxB20	1.08	0.235	---	---
CBhx5	1.00	0.080	54	97.2
CBhx10	1.01	0.119	53.1	97.3
CBhx15	1.02	0.161	52.2	97.6
CBhx20	1.05	0.188	51.5	98.1

4.4.8. MEB y EDS de los materiales compuestos

a). MEB de los materiales Colofonia-Biosílice

La Figura 40 muestra las imágenes de MEB y EDS de los materiales compuestos CB0, CB5, CB10, CB15 y CB20. La Figura 40a muestra a CB0 con una superficie lisa y una fase continua con partículas desprendidas en el proceso de acondicionamiento (Malmir et al., 2019).

Las Figuras 40b,c,d y e muestran a CB5, CB10, CB15 y CB20 respectivamente con partículas de biosílice de forma irregular y tamaños que varían de 5-40 micras. Las partículas de biosílice se aprecian esparcidas sobre la superficie de colofonia. Se observa un mayor número de partículas de biosílice en la superficie de la matriz a medida que incrementa el porcentaje de biosílice, esto va en concordancia con los gráficos del análisis elemental por EDS, en los cuales se observa el incremento de Si en los compósitos. Por lo tanto, la estructura y el rendimiento de los compuestos pueden verse modificados debido a la positiva dispersión de biosílice dentro de la matriz de colofonia (Zhu et al., 2021).



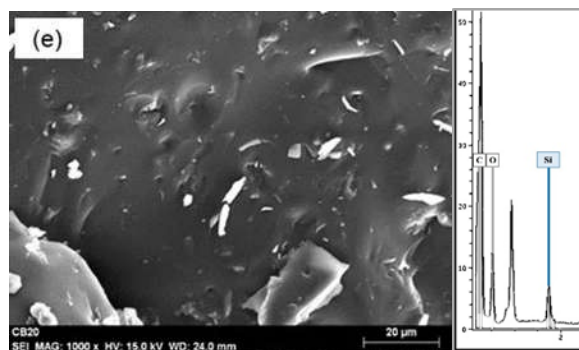


Figura 40. Imágenes MEB a 1000x y EDS de a) CB0, b) CB5, c) CB10, d) CB15 y e) CB20.

La Figura 41, es complementaria a la Figura 40, en la que se muestra el análisis de mapeo de rayos X (EDS) en CB5, CB10, CB15 y CB20. Los elementos presentes en los composites son carbono, oxígeno y silicio, donde este último está altamente disperso en cada una de las muestras analizadas; esto aun en altas concentraciones de SiO_2 .

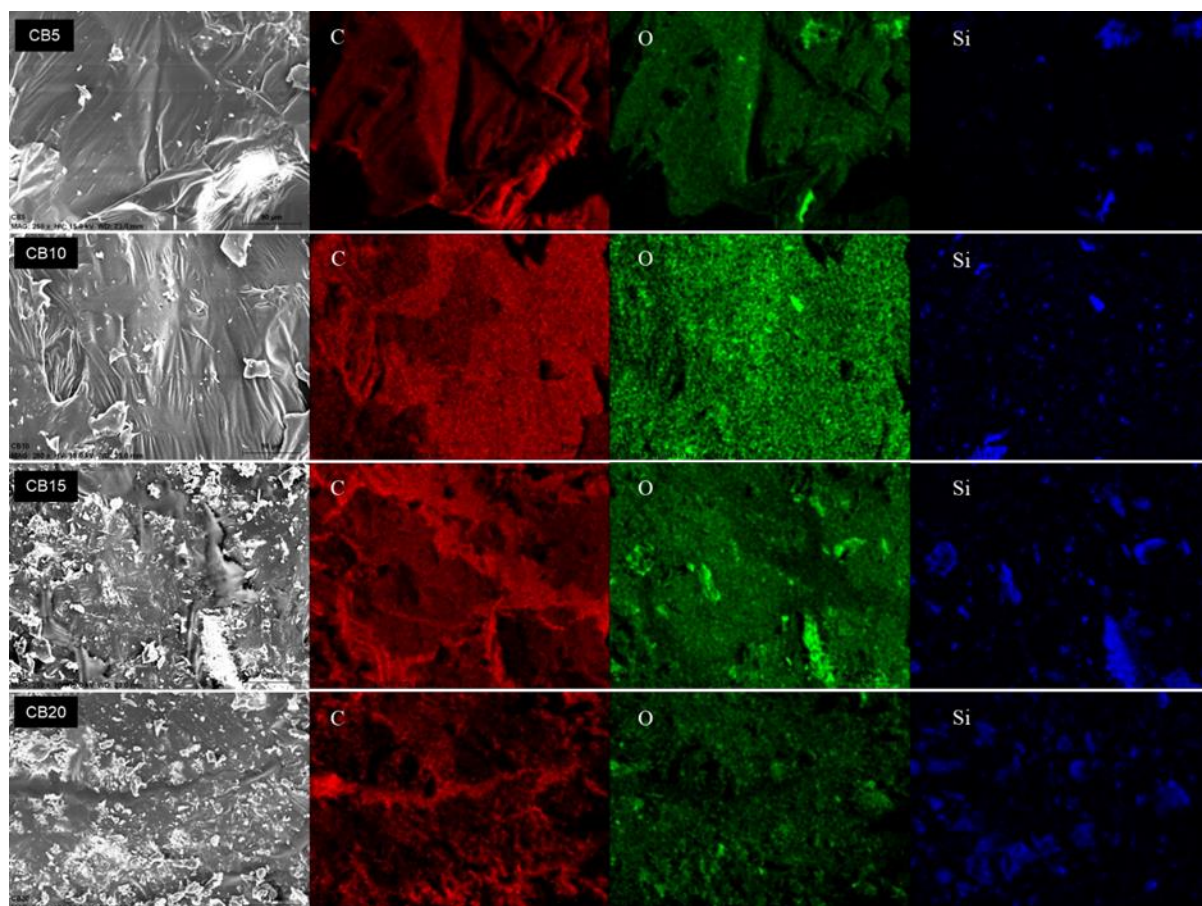


Figura 41. Imágenes de mapeo elemental EDS a 250x de CB5, CB10, CB15 y CB20.

b). MEB de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice

La Figura 42 muestra las imágenes de MEB y EDS de los materiales compuestos ChxB5 y ChxB20. La Figura 42a muestra a ChxB5 con una superficie lisa y una fase continua, las partículas de biosílice están esparcidas sobre la superficie, están totalmente embebidas por la colofonia hidroxilada, que resulta complicado diferenciarlas en la micrografía. Las partículas que se ven en primer plano fueron desprendidas en el proceso de acondicionamiento, el material es flexible (Malmir et al., 2019).

En la Figura 42b se muestra a ChxB20, se aprecia una superficie lisa con fase continua y un mayor número de partículas esparcidas en la superficie, esto va en concordancia con los gráficos del análisis elemental por EDS, en los cuales se observa el incremento de Si. Las partículas están totalmente embebidas en la matriz de colofonia hidroxilada y se ven como pequeñas protuberancias.

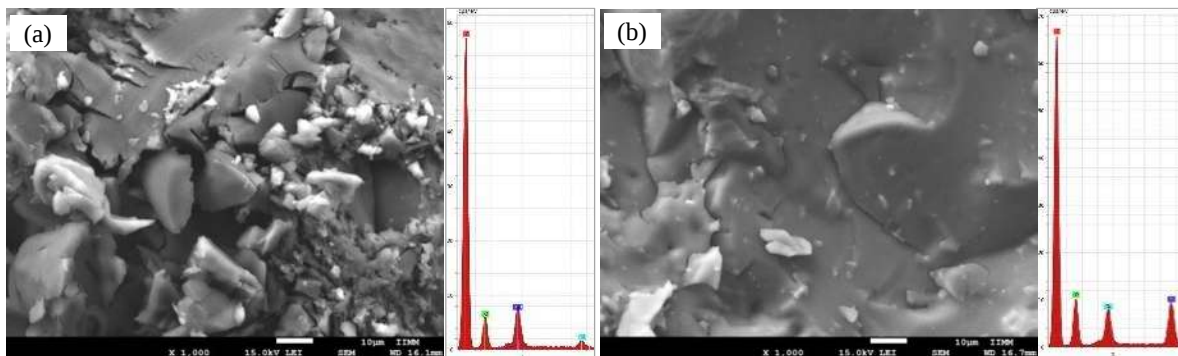


Figura 42. Imágenes MEB a 1000x y EDS de a) ChxB5 y b) ChxB20.

La Figura 43, es complementaria a la Figura 42, en la que se muestra el análisis de mapeo de rayos X (EDS) en ChxB5 y ChxB20. Los elementos presentes en los compósitos son carbono, oxígeno y silicio, donde este último está altamente disperso en cada una de las muestras analizadas; esto aun en altas concentraciones de SiO_2 .

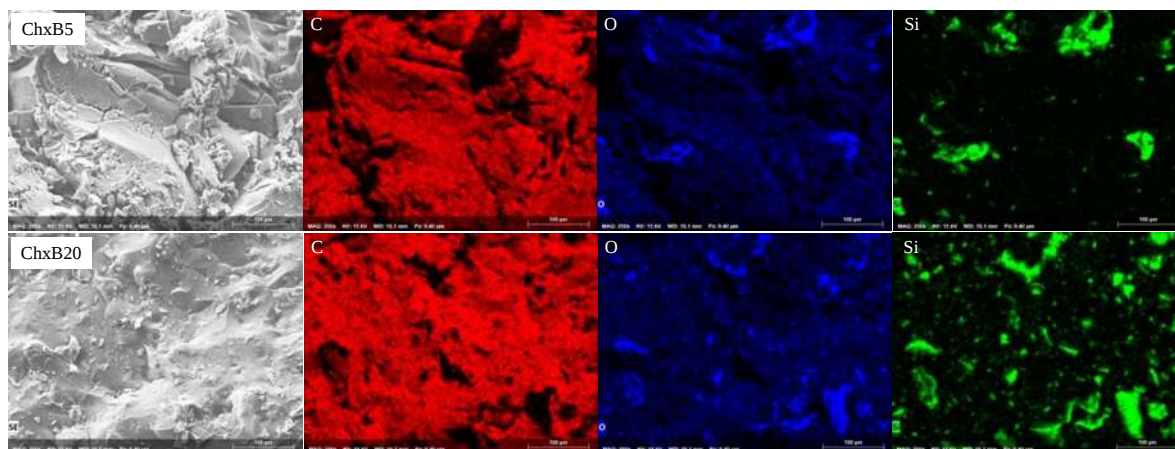


Figura 43. Imágenes de mapeo elemental EDS a 250x de ChxB5 y ChxB20.

c). MEB de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada

La Figura 44 muestra las imágenes de MEB y EDS de los materiales compuestos CBhx5 y CBhx20. La Figura 44a muestra a CBhx5 con una superficie lisa y una fase continua, las partículas de biosílice están esparcidas sobre la superficie, tienen forma irregular y tamaños que van desde 20 a 2 μm .

En la Figura 44b se muestra a CBhx20, se aprecia una superficie irregular y un mayor número de partículas esparcidas en la superficie, esto va en concordancia con los gráficos del análisis elemental por EDS, en los cuales se observa el incremento de Si. Las partículas de biosílice hidroxilada están totalmente embebidas en la matriz de colofonia. Se aprecia una microfisura que posiblemente se deba a la reducción de volumen que se expresó al explicar su densidad.

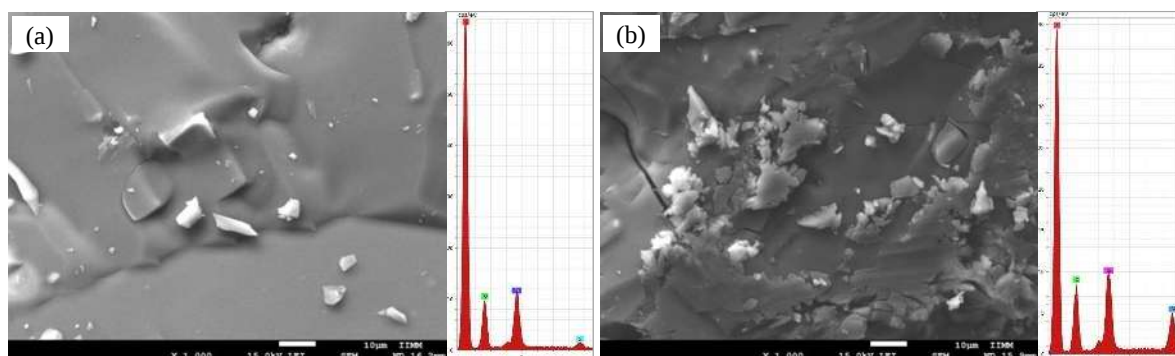


Figura 44. Imágenes MEB a 1000x y EDS de a) CBhx5 y b) CBhx20.

La Figura 45, es complementaria a la Figura 44, en la que se muestra el análisis de mapeo de rayos X (EDS) en CBhx5 y CBhx20. Los elementos presentes en los compósitos son carbono, oxígeno y silicio, donde este último está altamente disperso en cada una de las muestras analizadas; esto aun en altas concentraciones de SiO₂.

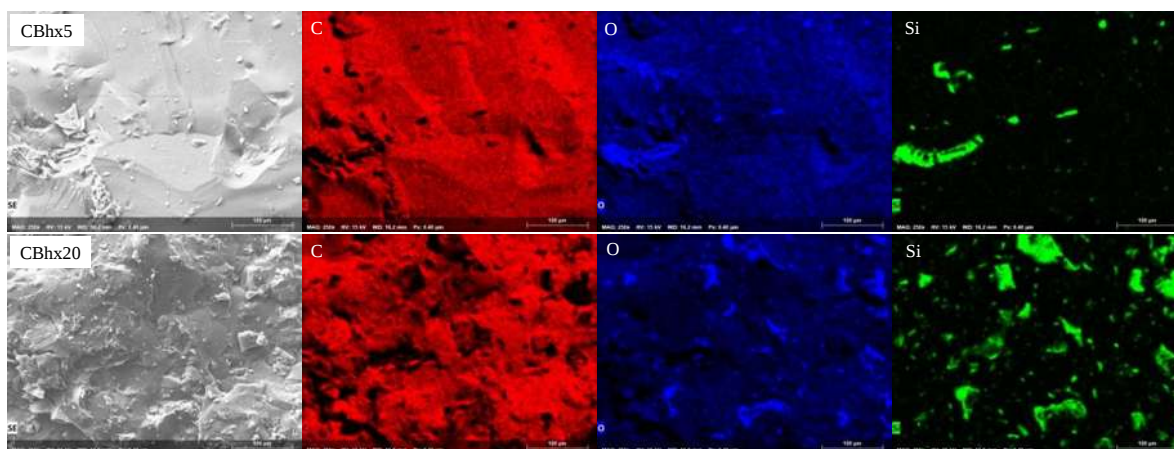


Figura 45. Imágenes de mapeo elemental EDS a 250x de CBhx5 y CBhx20.

4.4.9. FTIR de la asociación de los materiales compuestos

a). FTIR de los materiales Colofonia-Biosílice

La Figura 46 muestra los espectros IR de CB0, CB5, CB10, CB15 y CB20. Para los resultados del FTIR de CB0, hay presencia de grupos C-H a 2931 y 2870 cm⁻¹ (Pietrzak et al., 2014), una elongación C=O del grupo COOH a 1693 cm⁻¹ y el doble enlace de la fracción de hidrofenantreno a 1457 cm⁻¹ (Atta et al., 2006).

Los espectros de CB5, CB10, CB15 y CB20 son similares al CB0, con la adición de la señal a 3440 cm⁻¹ y 1270-870 cm⁻¹ asignada al enlace Si-OH y Si-O-Si respectivamente, donde estas señales son más intensas en correspondencia al incremento de la biosílice. Por lo anterior se puede deducir que la biosílice esta interactuando con la colofonia a través de enlaces silanol (Si-OH) y silicio-oxígeno (O-Si-O), y sobre todo en el rango 1270-870 cm⁻¹, manifestándose una clara tendencia de aumento en intensidad de las señales a medida que la cantidad de biosílice aumenta.

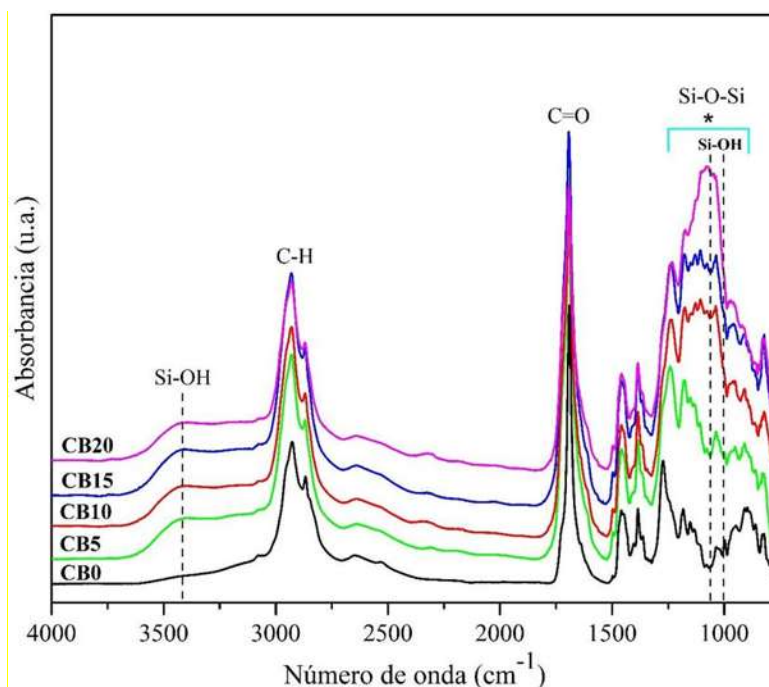


Figura 46. FTIR comparativo de CB0, CB5, CB10, CB15 y CB20.

b). FTIR de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice

La Figura 47 muestra los espectros IR de ChxB5, ChxB10, ChxB15 y ChxB20. Los resultados del FTIR en los cuatro espectros están presentes las señales características de la colofonia, hay presencia de grupos C-H a 2931 y 2870 cm^{-1} (Pietrzak et al., 2014), una elongación C=O del grupo COOH a 1693 cm^{-1} y el doble enlace de la fracción de hidrofenantreno a 1457 cm^{-1} (Atta et al., 2006).

Los espectros de ChxB5, ChxB10, ChxB15 y ChxB20 presentan dos señales adicionales, una a 3440 cm^{-1} asignada al enlace Si-OH, es de mayor intensidad en ChxB debido a que este material presenta un mayor porcentaje de colofonia hidroxilada (95%) lo que propicia la mayor interacción molecular. La otra señal está en el rango de $1270\text{-}870\text{ cm}^{-1}$ asignada al enlace Si-O-Si, donde estas señales son más intensas en correspondencia al incremento de la biosílice. Por lo anterior se puede deducir que la biosílice está interactuando con la colofonia hidroxilada (O-Si-O-...HO), y sobre todo en el rango $1270\text{-}870\text{ cm}^{-1}$, manifestándose una clara tendencia de aumento en intensidad de las señales a medida que la cantidad de biosílice aumenta.

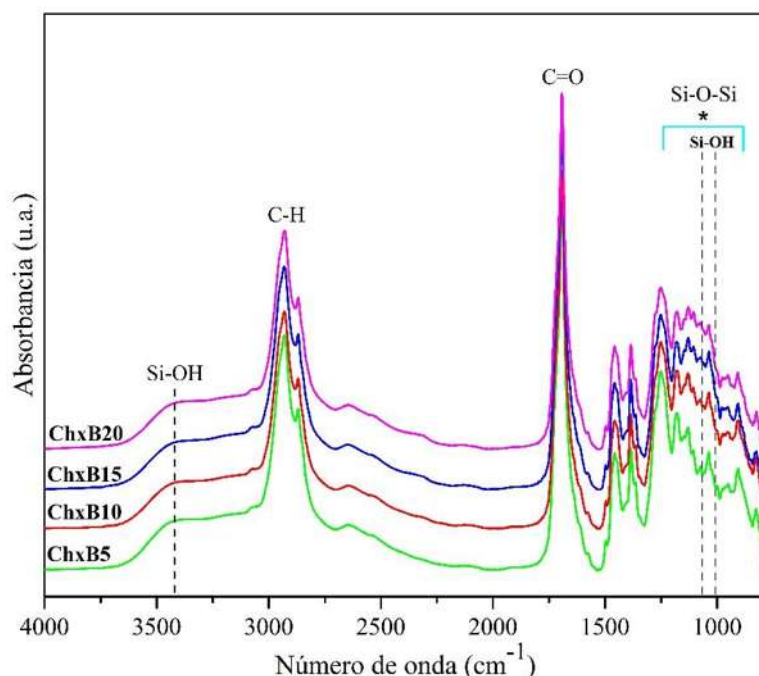


Figura 47. FTIR comparativo de ChxB5, ChxB10, ChxB15 y ChxB20.

c). FTIR de los materiales Colofonia-Biosílice hidroxilada

La Figura 48 muestra los espectros IR de CBhx5, CBhx10, CBhx15 y CBhx20. Los resultados del FTIR en los cuatro espectros están presentes las señales características de la colofonia, hay presencia de grupos C-H a 2931 y 2870 cm^{-1} (Pietrzak et al., 2014), una elongación C=O del grupo COOH a 1693 cm^{-1} y el doble enlace de la fracción de hidrofenantreno a 1457 cm^{-1} (Atta et al., 2006).

Los espectros presentan dos señales adicionales una a 3440 cm^{-1} asignada al enlace Si-OH, y otra señal está en el rango de 1270-870 cm^{-1} asignada al enlace Si-O-Si, donde estas señales son más intensas en correspondencia al incremento de la biosílice hidroxilada. Por lo anterior se puede deducir que la biosílice hidroxilada esta interactuando con la colofonia (O-Si-O- $\cdots$ HO), y sobre todo en el rango 1270-870 cm^{-1} .

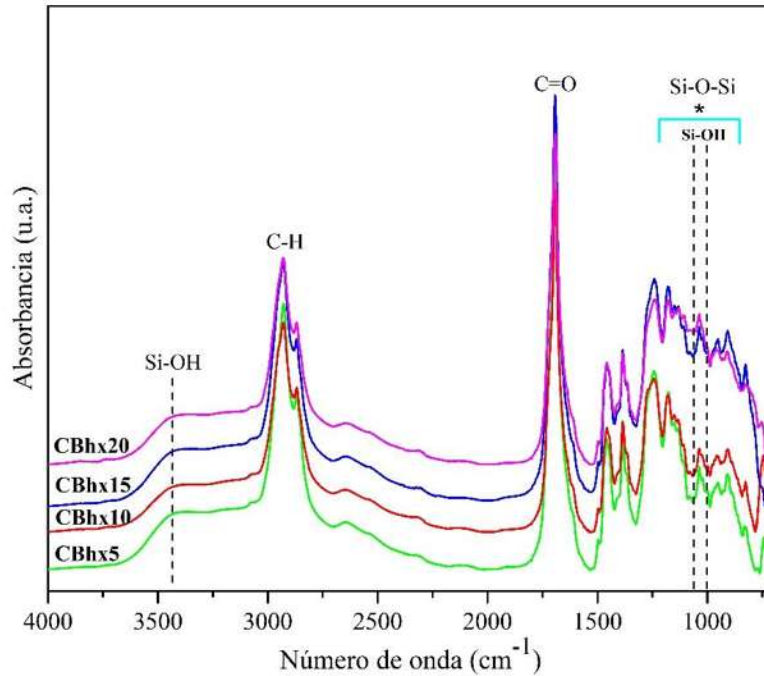


Figura 48. FTIR comparativo de CBhx5, CBhx10, CBhx15 y CBhx20.

d). FTIR de los materiales Colofonia hidroxilada-Biosílice hidroxilada

La Figura 49 muestra los espectros IR de ChxBhx5, ChxBhx10, ChxBhx15 y ChxBhx20. Por FTIR en los espectros se identifican las señales características de la colofonia; presencia de grupos C-H a 2931 y 2870 cm^{-1} (Pietrzak et al., 2014), una elongación C=O del grupo COOH a 1693 cm^{-1} y el doble enlace de la fracción de hidrofenantreno a 1457 cm^{-1} (Atta et al., 2006).

Los espectros presentan dos señales adicionales una a 3440 cm^{-1} asignada al enlace Si-OH, y otra señal está en el rango de 1270-870 cm^{-1} asignada al enlace Si-O-Si, donde estas señales son más intensas para ChxBhx5 y ChxBhx10. Por lo anterior se puede deducir que la colofonia hidroxilada interactúa mayormente con biosílice hidroxilada (O-Si-O-...HO), y sobre todo en el rango 1270-870 cm^{-1} .

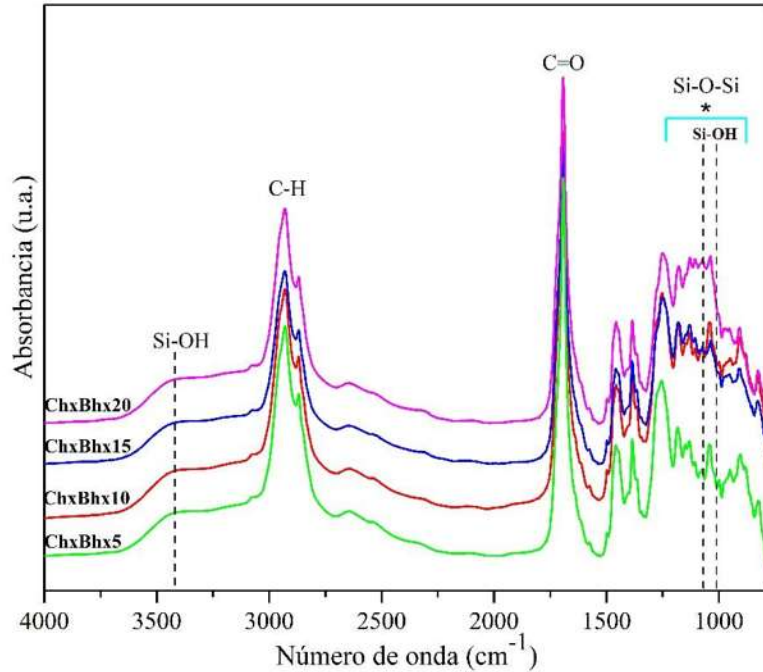


Figura 49. FTIR comparativo de ChxBhx5, ChxBhx10, ChxBhx15 y ChxBhx20.

4.5. TGA y DTG de la asociación de los materiales Colofonia-Biosílice

Los resultados del análisis térmico de los compósitos CB se presentan en curvas termogravimétricas en la Figura 50, con su primera derivada en la Figura 51 y los datos relevantes se resumen en la Tabla 2, donde $T_{5\%}$ indica la temperatura de pérdida de peso del 5%, $T_{\max}$ indica la temperatura de pérdida máxima de peso y $R_{T_{\max}}$ denota la tasa de pérdida de peso en $T_{\max}$.

En la Figura 50 se observa a CB0 donde la temperatura de inicio de degradación se sitúa en 200 °C, la temperatura de degradación máxima está en 330 °C y la temperatura de finalización de la degradación se encuentra en 450 °C. En el rango entre 200 y 450 °C ocurre la descomposición térmica de la colofonia, y en este rango hubo una pérdida de masa del 98.19%, que se atribuye a los ácidos abiético y pimárico (Fink, 2017). Pietrzak et al., 2014 también encontraron una descomposición de la colofonia entre 200 y 450°C.

La tasa de pérdida de peso en $T_{\max}$ disminuyó de 16.0 % min^{-1} en CB0 a 7.0 % min^{-1} en CB20. Esto se debe a que la biosílice se descompone a alta temperatura, siendo muy resistente

térmicamente. Además, el rendimiento residual aumentó de 1.6 % en CB0 a 20.0 % en CB20. Lo anterior sugiere una interacción sinérgica entre biosílice y colofonia. Lo que se traduce como una mejora en la degradación térmica de los materiales compuestos.

Tabla 3. Datos relevantes de TGA para los compósitos CB0-CB20.

Muestra	T _{5%} [°C]	T _{max} [°C]	R _{Tmax} [% min ⁻¹]	Masa residual a 600 °C [%]
CB0	235.0	330	16.0	1.6
CB5	193.3	288	7.2	4.9
CB10	193.5	321	6.9	10.4
CB15	203.1	334	7.5	14.6
CB20	200.8	327	7.0	20.0

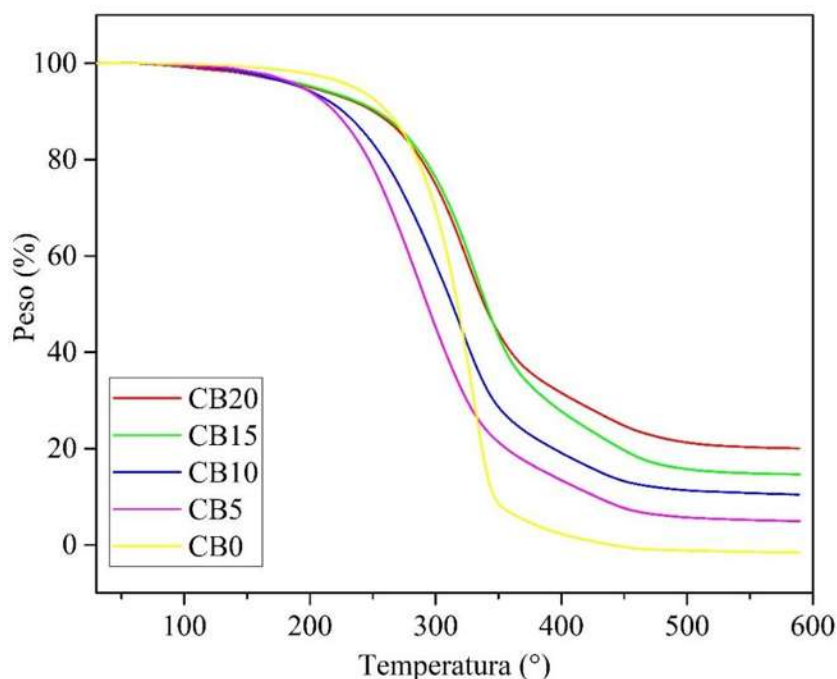


Figura 50. Curvas TGA de CB0, CB5, CB10, CB15 y CB20.

La Figura 51 corresponde a la primera derivada de las curvas termogravimétricas CB0-CB20, se aprecian dos importantes corrimientos en la temperatura de degradación, uno en la degradación máxima entre CB0 y CB15 de 330 °C a 334 °C respectivamente, y otro en el fin de degradación entre CB0 y CB20 de 450 °C y 500°C respectivamente, lo cual se traduce en un aumento en la resistencia térmica de CB15 y CB20 respecto a CB0. Este resultado se debe a la

positiva interacción entre colofonia y biosílice mejorando la estabilidad térmica de los biocompuestos. Al mismo tiempo, también indica que la estructura y la capacidad de respuesta de colofonia mejoran al agregar biosílice. Se observaron resultados similares en lo reportado por Zhu et al., 2021.

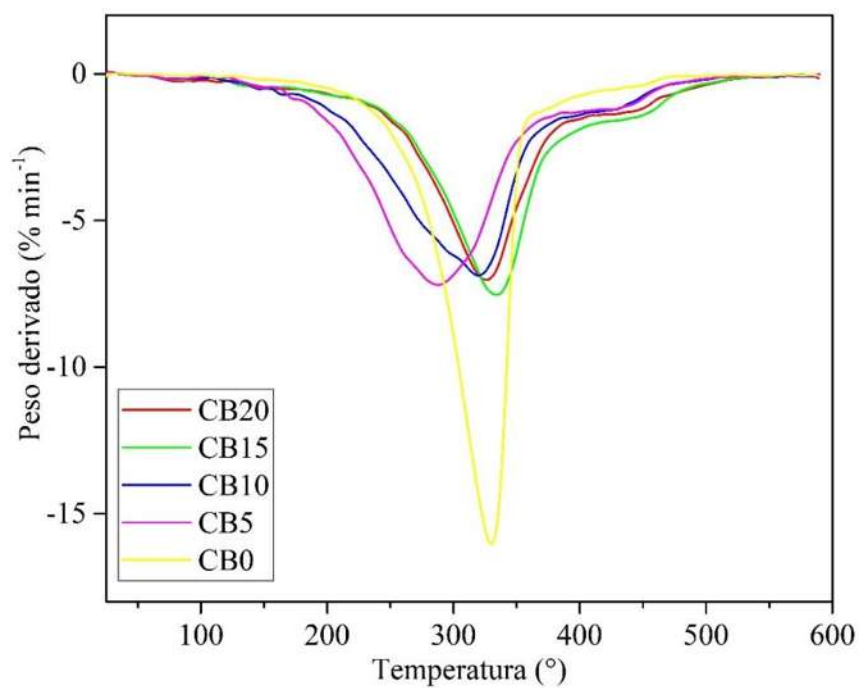


Figura 51. Curvas DTG de CB0, CB5, CB10, CB15 y CB20.

V. CONCLUSIONES

Se obtuvo el compósito CB satisfactoriamente, al evaluar sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas se encontraron valores superiores en casi todas las pruebas comparados con colofonia pura.

Se determinó que a partir de un proceso químico-térmico la cáscara de arroz genera biosílice de alta pureza, lo cual se determinó mediante los análisis por FTIR, DRX y MEB. De igual manera se corroboró por la técnica de FTIR que el proceso seguido en este trabajo para la obtención de colofonia hidroxilada fue exitoso.

Se elaboraron los compósitos CB, ChxB y CBhx de manera apropiada. Se determinó que son homogéneos, con brillo y sin fisuras aparentes, presentan una adecuada dispersión de biosílice y biosílice hidroxilada en la matriz de colofonia y colofonia hidroxilada, de acuerdo a una inspección visual y a los análisis por SEM.

Las propiedades físico mecánicas de los materiales compuestos son mejoradas al agregar biosílice. Todos los compósitos de CB, ChxB y CBhx absorben muy poca agua (menos del 1%) debido al carácter hidrófobo de la colofonia que protege a las partículas de biosílice de la humedad. Los compósitos CB y CBhx presentan un aumento en la humectabilidad superficial al incrementar la cantidad de biosílice y biosílice hidroxilada, como lo evidencian los ángulos de contacto. Esto podría deberse a la estructura porosa de la biosílice y a la fracción hidrófila de la colofonia; aun así, los materiales se siguen considerando hidrófobos. La dureza en los compuestos CB y CBhx, mostró un incremento de 1.5 % y 1.3 % respectivamente, este incremento es significativo y congruente con el incremento también en la densidad de los compuestos. En los compósitos CB, el proceso de combustión fue demorado, evidenciado por una diferencia en el tiempo de quemado de 80 s entre CB0 y CB20, debido a que las partículas de biosílice suprimen la liberación de calor.

La caracterización por MEB de los compósitos CB, ChxB y CBhx evidenció una positiva dispersión de las partículas de biosílice y biosílice hidroxilada en la matriz de colofonia y colofonia hidroxilada. También se determinó que las partículas son de forma irregular y de tamaños que

varían de 2-40 μm . Por EDS se determinó que los elementos presentes en los compósitos son C, O y Si, este último incrementa de manera congruente al incrementar su concentración en los compuestos. Mediante el análisis por FTIR se pudo identificar que la interacción entre biosílice y colofonia se da a través de los grupos OH's formando enlaces silanol y en el rango de dióxido de silicio ($1260\text{-}740\text{ cm}^{-1}$), manifestándose una clara tendencia de aumento en intensidad de estas señales a medida que aumenta la cantidad de biosílice. La resistencia térmica de los materiales compuestos aumentó al incrementar el contenido de biosílice. La temperatura de degradación máxima de los compuestos CB aumenta a mayor concentración de biosílice, esto se debe a que la descomposición de biosílice se produce a temperaturas elevadas, determinado a partir de las curvas TGA.

Los materiales compuestos presentan un incremento en los valores de sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Con base en lo anterior, se puede afirmar que la colofonia mejora sus propiedades al agregarle biosílice. Los materiales compuestos obtenidos presentan propiedades adecuadas para posibles aplicaciones de embalaje.

VI. ALCANCES

Los materiales compuestos elaborados y caracterizados en esta investigación demostraron su potencial en cuanto a su resistencia al fuego y baja absorción de agua. Con estas propiedades podrían emplearse en múltiples aplicaciones, además del embalaje. Adicionalmente, son materiales renovables y sostenibles a partir de recursos naturales.

Las propiedades de los compósitos elaborados en esta investigación podrían complementarse con ensayos de resistencia a la tracción y resistencia al desgaste. Así como conocer su biodegradabilidad mediante procesos de envejecimiento o compostaje.

Posibles aplicaciones de los compósitos:

- Tableros para cubierta de cajuela de autos.
- Compuestos-plásticos verdes, ecológicos y económicos.
- Recubrimiento en madera sólida, acero y tableros a base de madera.
- Retardante de llama en espumas y plásticos sintéticos.

Estas aplicaciones no se exploraron en esta investigación pero podrían aplicarse con base en la literatura y las propiedades del material.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Raouf, M. E., Chem, B., Abdel-raouf, M. E., & Abdul-raheim, A. M. (2018). Rosin: Chemistry, Derivatives, and Applications: a review. *BAOJ Chemistry Manar*, 4(1), 39.
- Adam, F., Hello, K. M., & Aisha, M. R. B. (2011). The synthesis of heterogeneous 7-amino-1-naphthalene sulfonic acid immobilized silica nano particles and its catalytic activity. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(5), 843-851. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.02.002>
- Aldas, M., Pavon, C., Ferri, J. M., Arrieta, M. P., & López-Martínez, J. (2021). Films based on mater-bi® compatibilized with pine resin derivatives: Optical, barrier, and disintegration properties. *Polymers*, 13(9), 1506. <https://doi.org/10.3390/polym13091506>
- Aldas, M., Valle, V., Aguilar, J., Pavon, C., Santos, R., & Luna, M. (2021). Ionizing radiation as adjuvant for the abiotic degradation of plastic bags containing pro-oxidant additives. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(2), 49664. <https://doi.org/10.1002/app.49664>
- Al-Malaika, S., Axtell, F., Rothon, R., & Gilbert, M. (2017). Additives for Plastics. *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition*, 127–168. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00007-4>
- Am Aridi, N., M. Sapuan, S., S. Zainudin, E., & M. Al-Oqla, F. (2017). A review of rice husk bio-based composites. *Current Organic Synthesis*, 14(2), 263-271. <https://doi.org/10.2174/1570179413666160920163613>
- Amutha, K., Ravibaskar, R., & Sivakumar, G. (2010). Extraction, synthesis and characterization of nanosilica from rice husk ash. *International Journal of Nanotechnology and applications*, 4(1), 61-66.
- Andrady, A. L., Rajapakse, N., Andrady, A. L., Rajapakse, N., Takada, H., & Karapanagioti, H. K. (2016). Additives and Chemicals in Plastics. *Handbook of Environmental Chemistry*, 78, 1–17. https://doi.org/10.1007/698_2016_124
- Ashori, A. (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource technology*, 99(11), 4661-4667. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.043>
- Atta, A. M., El-Saeed, S. M., & Farag, R. K. (2006). New vinyl ester resins based on rosin for coating applications. *Reactive and Functional Polymers*, 66(12), 1596-1608. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.06.002>
- Ayswarya, E. P., Francis, K. V., Renju, V. S., & Thachil, E. T. (2012). Rice husk ash—A valuable reinforcement for high density polyethylene. *Materials & Design*, 41, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.035>

- Bakar, R. A., Yahya, R., & Gan, S. N. (2016). Production of high purity amorphous silica from rice husk. *Procedia chemistry*, 19, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.092>
- Barry, T. H., Drummond, A. A., & Morrell, R. S. (1927). The chemistry of the natural & synthetic resins. Van Nostrand.
- Benson, N. U., Bassey, D. E., & Palanisami, T. (2021). COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, 7(2). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06343>
- Biodiversidad Arrecifal, G. M. L., Oslet, R. G. O., Lorenzo, Á. F., Miguel, R., Ornela, G. R., Esmeralda, P. C., & Nuria, E. S. (2020). Impacto de la contaminación por plástico en áreas naturales protegidas mexicanas. *Greenpeace México*.
- Bohlmann, J., & Keeling, C. I. (2008). Terpenoid biomaterials. *Plant Journal*, 54(4), 656–669. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03449.x>
- Brocas, A. L., Llevot, A., Mantzaridis, C., Cendejas, G., Auvergne, R., Caillol, S., ... & Cramail, H. (2014). Epoxidized rosin acids as co-precursors for epoxy resins. *Designed Monomers and Polymers*, 17(4), 301-310. <https://doi.org/10.1080/15685551.2013.840504>
- Buteler, M. (2019). ¿Qué es la contaminación por plástico y por qué nos afecta a todos?.
- Cabaret, T., Boulicaud, B., Chatet, E., & Charrier, B. (2018). Study of rosin softening point through thermal treatment for a better understanding of maritime pine exudation. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(5), 1453–1459. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1339-3>
- Calleja, D. (2019). Why the “New Plastics Economy” must be a circular economy. *Field Actions Science Reports. The journal of field actions*, (Special Issue 19), 22-27. <http://journals.openedition.org/factsreports/5123>
- Chen, L., He, X., Liu, H., Qian, L., & Kim, S. H. (2018). Water adsorption on hydrophilic and hydrophobic surfaces of silicon. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(21), 11385-11391. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b01821>
- Chen, Y., Wilbon, P. A., Chen, Y. P., Zhou, J., Nagarkatti, M., Wang, C., ... & Tang, C. (2012). Amphipathic antibacterial agents using cationic methacrylic polymers with natural rosin as pendant group. *RSC advances*, 2(27), 10275-10282. <http://doi.org/10.1039/C2RA21675B>
- Chen, Y., Wilbon, P. A., Zhou, J., Nagarkatti, M., Wang, C., Chu, F., & Tang, C. (2013). Multifunctional self-fluorescent polymer nanogels for label-free imaging and drug delivery. *Chemical Communications*, 49(3), 297-299. DOI <https://doi.org/10.1039/C2CC37386F>
- Chiavari, G., Fabbri, D., & Prati, S. (2002). Characterisation of natural resins by pyrolysis - Silylation. *Chromatographia*, 55(9–10), 611–616. <https://doi.org/10.1007/BF02492910>

- Christian, S. J. (2016). Natural fibre-reinforced noncementitious composites (biocomposites). *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*, 111–126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100038-0.00005-6>
- Ciesla, W. M. (2009). Products of Resin Processing. In J. Owens & H. Gyde Lund (Eds.), *Forest and Forest Plants*: Vol. II. EOLSS publishers. <http://www.eolss.net/sample-chapters/c10/e5-03-03-05.pdf>
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Boix, A. C. (2018). Isolation and characterisation of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk. *Carbohydrate polymers*, 191, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.022>
- Collin, G. (2014). Hydrocarbon Resins. http://www.eastman.com/Markets/Tackifier_Center/Tackifier_Families/Hydrocarbon_Resins/Pages/Hydrocarbon_Resins.aspx
- Coppen, J. W., & Hone, G. A. (1995). Gum naval stores: turpentine and rosin from pine pine resin. In *Non-wood forest products 2*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Corredor, G., Sarria, J. A., Gallo Corredor, J. A., & Sarria Villa, R. A. (2013). Obtención de Colofonia y Trementina a Partir de Resina de Pino de la Especie patula y Posterior Evaluación de los Parámetros de Calidad. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 5(1), 88–91.
- Cunningham, A. (2012). Pine resin tapping techniques used around the world. *Pine Resin: Biology, Chemistry and Applications*, 661(2), 1–8.
- Da Silva Rodrigues-Corrêa, K. C., de Lima, J. C., & Fett-Neto, A. G. (2013). Oleoresins from pine: Production and industrial uses. In *Natural Products: Phytochemistry, Botany and Metabolism of Alkaloids, Phenolics and Terpenes* (pp. 4037–4060). *Springer Berlin Heidelberg*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6_175
- Dagade, M. P., & Shaikh, S. M. (2015). Fabrication of composite materials by using short pineapple leaf fiber PALF: A Review. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 1-9.
- Di Bartolo, A., Infurna, G., & Dintcheva, N. T. (2021). A review of bioplastics and their adoption in the circular economy. *Polymers*, 13(8), 1229. <https://doi.org/10.3390/POLYM13081229>
- European Bioplastics. (2018). What are bioplastics? Material types, terminology, and labels—an introduction. www.european-bioplastics.org/multimedia
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

- Franceschi, V. R., Krokene, P., Christiansen, E., & Krekling, T. (2005). Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and other pests. *In New Phytologist* (Vol. 167, Issue 2, pp. 353–376). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01436.x>
- Gad, S.E. Polymers. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 1045–1050. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00912-X>
- Ganewatta, M. S., Chen, Y. P., Wang, J., Zhou, J., Ebalunode, J., Nagarkatti, M., ... & Tang, C. (2014). Bio-inspired resin acid-derived materials as anti-bacterial resistance agents with unexpected activities, *Chem. Sci*, 5, 2011-2016.
- Ganewatta, M. S., Miller, K. P., Singleton, S. P., Mehrpouya-Bahrami, P., Chen, Y. P., Yan, Y., ... & Tang, C. (2015). Antibacterial and biofilm-disrupting coatings from resin acid-derived materials. *Biomacromolecules*, 16(10), 3336-3344. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b01005>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gilbert, M. (2017). Plastics materials: Introduction and historical development. In *Brydson's plastics materials* (pp. 1-18). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00001-3>
- Goffin, A. L., Raquez, J. M., Duquesne, E., Siqueira, G., Habibi, Y., Dufresne, A., & Dubois, P. (2011). From interfacial ring-opening polymerization to melt processing of cellulose nanowhisker-filled polylactide-based nanocomposites. *Biomacromolecules*, 12(7), 2456-2465. <https://doi.org/10.1021/bm200581h>
- Gourava, J. (2019). Characterization of Indian pine Oleoresin and Evidence for the existence of Silicon compounds. 6(1).
- Greene, J. P. (2021). Bio-Based and Biodegradable Plastics. *Automotive Plastics and Composites*, 149–174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00020-9>
- Guerrero, V., Pontón, P., Tamayo, A., Villacís, H., Delgado, F., & Galeas, S. (2013, July). Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y sintéticas. In *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE* (Vol. 8, No. 1, pp. 70-74).
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2017.10.014>
- Hall, D. E., Zerbe, P., Jancsik, S., Quesada, A. L., Dullat, H., Madilao, L. L., Yuen, M., & Bohlmann, J. (2013). Evolution of Conifer Diterpene Synthases: Diterpene Resin Acid Biosynthesis in

Lodgepole Pine and Jack Pine Involves Monofunctional and Bifunctional Diterpene Synthases. *Plant Physiology*, 161(2), 600. <https://doi.org/10.1104/PP.112.208546>

Harima Chemicals Group Inc. (2021). Rosin Production and Rosin Market. https://www.harima.co.jp/en/pine_chemicals/rosin3.html

Hernández Tapia, C. P., & Vanegas Duarte, C. M. (2001). Estudio de la cinética de la reacción de esterificación de colofonia, determinación de las condiciones de operación requeridas para la obtención de una resina con características comerciales y dimensionamiento de planta piloto.

Hill, R. G. (2005). Polymers. In *Biomaterials, Artificial Organs and Tissue Engineering* (pp. 37-47). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845690861.1.37>

Hockey, J. A., & Pethica, B. A. (1961). Surface hydration of silicas. *Transactions of the Faraday Society*, 57, 2247-2262. <https://doi.org/10.1039/TF9615702247>

Hong, M., & Chen, E. Y. X. (2019). Future directions for sustainable polymers. *Trends in Chemistry*, 1(2), 148-151. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.03.004>

Jia, P., Ma, Y., Zhang, M., Hu, L., & Zhou, Y. (2019). Designing rosin-based plasticizers: effect of differently branched chains on plasticization performance and solvent resistance of flexible poly (vinyl chloride) films. *ACS omega*, 4(2), 3178-3187. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03612>

Karlberg, A.-T. (2012). Colophony: Rosin in Unmodified and Modified Form. In *Kanerva's Occupational Dermatology*, (Vols. 1–3, pp. 467–479). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02035-3>

Karthikeyan, B., Hariharan, S., Sasidharan, A., Gayathri, V., Arun, T., Akbari-Fakhrabadi, A., & Madhumitha, C. (2019). Optical, vibrational and fluorescence recombination pathway properties of nano SiO₂-PVA composite films. *Optical Materials*, 90, 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.01.063>

Kumar, S., Mer, K. K. S., Gangil, B., & Patel, V. K. (2019). Synergy of rice-husk filler on physico-mechanical and tribological properties of hybrid Bauhinia-vahlia/sisal fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Research and technology*, 8(2), 2070-2082. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.021>

Lakshmikumar, V., & Sridharan, V. (2018). Global impact of the modern chemical industry. In Pine Chemical Association, Inc. https://www.pinechemicals.org/resource/resmgr/Studies/PCA_Global_Impact_of_the_Mo.pdf

Lam, E. U., Pliego, M. G. G., Pérez, V. G. M., & Ramirez, A. M. (2012). Determination of mechanical properties of biodegradable composites made by pine resin corn fibers and henequen fibers. *Key Engineering Materials*, 517, 422-429. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.517.422>

Langenheim, J. H. (1990). Plant resins. *American Scientist*, 78(1), 16-24.

- Mahendra, V. (2019). Rosin Product Review. *Applied Mechanics and Materials*, 890, 77–91. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.890.77>
- Maiti, S., Ray, S. S., & Kundu, A. K. (1989). Rosin: a renewable resource for polymers and polymer chemicals. *Progress in Polymer Science*, 14(3), 297–338. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(89\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0079-6700(89)90005-1)
- Malmir, S., Montero, B., Rico, M., Barral, L., Bouza, R., & Farrag, Y. (2019). PHBV/CNC bionanocomposites processed by extrusion: Structural characterization and properties. *Polymer Composites*, 40(S1), E275-E284. <https://doi.org/10.1002/pc.24634>
- Marilys, B. (2013). Caractéristiques différentielles de la résine. II Simposio Internacional de Resinas Naturales, 182–187.
- Mazón Ortiz, G. E. (2017). Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster con fibra de coco para la determinación de propiedades mecánicas en aplicaciones industriales.
- Mena M. (2009). Estratificación de colofonia con glicerina: estudio cinético y fenomenológico.
- Miao, J. T., Yuan, L., Guan, Q., Liang, G., & Gu, A. (2017). Biobased heat resistant epoxy resin with extremely high biomass content from 2, 5-furandicarboxylic acid and eugenol. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(8), 7003-7011. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01222>
- Mills, J. S., & White, R. (1977). Natural Resins of Art and Archaeology Their Sources, Chemistry, and Identification. *Studies in Conservation*, 22(1), 12–31. <https://doi.org/10.1179/sic.1977.003>
- Moustafa, H., Darwish, N. A., & Youssef, A. M. (2022). Rational formulations of sustainable polyurethane/chitin/rosin composites reinforced with ZnO-doped-SiO₂ nanoparticles for green packaging applications. *Food Chemistry*, 371, 131193. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131193>
- Narayanan, M., Loganathan, S., Valapa, R. B., Thomas, S., & Varghese, T. O. (2017). UV protective poly (lactic acid)/rosin films for sustainable packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 99, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.152>
- Nicholas, K. M. (Ed.). (2014). Selective catalysis for renewable feedstocks and chemicals (Vol. 353). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08654-5>
- Ortega, María; Garrido, Beatriz; Suarez, María, Camacho, Pedro; Martínez, S. (2013). Guía básica de trabajos de resinación en pinares (A. P. Y. D. S. – PRODESE, Ed.).
- Patel, V. K., & Rawat, N. (2017). Physico-mechanical properties of sustainable Sagwan-Teak Wood Flour/Polyester Composites with/without gum rosin. *Sustainable materials and technologies*, 13, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.05.002>

- Pellis, A., Malinconico, M., Guarneri, A., & Gardossi, L. (2021). Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green. *New Biotechnology*, 60, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.003>
- Phillips, M. A., & Croteau, R. B. (1999). Resin-based defenses in conifers. In *Trends in Plant Science* (Vol. 4, Issue 5, pp. 184–190). *Elsevier Current Trends*. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(99\)01401-6](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(99)01401-6)
- Picardo, A., Pinillos, F., & Andrade Camacho, M. (2009). La resina: Herramienta de conservación de nuestra pinares. http://contenidos.educarex.es/mci/2009/43/TEMA2/resina_epoxidicas.pdf
- Pietrzak, K., Kirpluks, M., Cabulis, U., & Ryszkowska, J. (2014). Effect of the addition of tall oil-based polyols on the thermal and mechanical properties of ureaurethane elastomers. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.03.038>
- Prime, R. B., Bair, H. E., Vyazovkin, S., Gallagher, P. K., & Riga, A. (2009). Thermogravimetric analysis (TGA). *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*, 241-317. <https://doi.org/10.1002/9780470423837>
- Queiroz, A. U., & Collares-Queiroz, F. P. (2009). Innovation and industrial trends in bioplastics. *Journal of Macromolecular Science®*, Part C: Polymer Reviews, 49(2), 65-78. <https://doi.org/10.1080/15583720902834759>
- Rattanasak, U., Chindaprasirt, P., & Suwanvitaya, P. (2010). Development of high volume rice husk ash alumino silicate composites. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 17(5), 654-659. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0370-0>
- Requena, R., Jimenez-Quero, A., Vargas, M., Moriana, R., Chiralt, A., & Vilaplana, F. (2019). Integral fractionation of rice husks into bioactive arabinoxylans, cellulose nanocrystals, and silica particles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(6), 6275-6286. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06692>
- Rifé Lamprecht, M. del P. (1949). Investigación sobre nuevos derivados de la colofonia.
- Rodrigues-Corrêa, K. C. da S., de Lima, J. C., & Fett-Neto, A. G. (2012). Pine oleoresin: Tapping green chemicals, biofuels, food protection, and carbon sequestration from multipurpose trees. In *Food and Energy Security* (Vol. 1, Issue 2, pp. 81–93). Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/fes3.13>
- Rodriguez, F., Cohen, C., Ober, C.K., & Archer, L. (2014). Principles of Polymer Systems (6th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17873>
- Rodríguez-García, A., Martín, J. A., López, R., Sanz, A., & Gil, L. (2016). Effect of four tapping methods on anatomical traits and resin yield in Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Industrial Crops and Products*, 86, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.033>

- Roy, S. S., Kundu, A. K., & Maiti, S. (1990). Polymers from renewable resources—13. Polymers from rosin acrylic acid adduct. *European polymer journal*, 26(4), 471–474. [https://doi.org/10.1016/0014-3057\(90\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0014-3057(90)90055-9)
- Savluchinske-Feio, S., Curto, M. J. M., Gigante, B., & Roseiro, J. C. (2006). Antimicrobial activity of resin acid derivatives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 72(3), 430–436. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0517-0>
- Scalarone, D., Lazzari, M., & Chiantore, O. (2002). Ageing behaviour and pyrolytic characterisation of diterpenic resins used as art materials: Colophony and Venice turpentine. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 64(2), 345–361. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(02\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(02)00046-3)
- Secretaría de Economía México. (2022). <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/rosin-and-resin-acids>
- Shrivastava, A. (2018). Plastic Properties and Testing. *Introduction to Plastics Engineering*, 49–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00003-4>
- Sierra-Alvarez, R., & Lettinga, G. (1990). The methanogenic toxicity of wood resin constituents. *Biological Wastes*, 33(3), 211–226. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(90\)90006-E](https://doi.org/10.1016/0269-7483(90)90006-E)
- Sifontes, Á. B., Gutierrez, B., Mónaco, A., Yanez, A., Díaz, Y., Méndez, F. J., Llovera, L., Cañizales, E., & Brito, J. L. (2014). Preparation of functionalized porous nano- γ -Al₂O₃ powders employing colophony extract. *Biotechnology Reports*, 4(1), 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.07.001>
- Silvestre, A. J. D., & Gandini, A. (2008). Rosin: Major Sources, Properties and Applications. In *Monomers, Polymers and Composites from Renewable resources* (pp. 67–88). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00004-1>
- Sipponen, A., & Laitinen, K. (2011). Antimicrobial properties of natural coniferous rosin in the European Pharmacopoeia challenge test. *Apmis*, 119(10), 720–724. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0463.2011.02791.x>
- Smith, B. (2011). *Fundamental of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Segunda)*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 364(1526), 2127–2139. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>
- Susanto, T. (2019, April). Impacts of rice husk ash filler loading on curing, morphological characteristics and tensile properties of natural rubber/ethylene propylene rubber blends. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 509, No. 1, p. 012116). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012116>

- Termentzi, A., Fokialakis, N., & Leandros Skaltsounis, A. (2011). Natural Resins and Bioactive Natural Products thereof as Potential Antimicrobial Agents. *Current Pharmaceutical Design*, 17(13), 1267–1290. <https://doi.org/10.2174/138161211795703807>
- Thakur, M., Sharma, A., Chandel, M., & Pathania, D. (2022). Modern applications and current status of green nanotechnology in environmental industry. In *Green functionalized nanomaterials for environmental applications* (pp. 259-281). Elsevier.
- Tribe, N. C. (1974). Utilization and recycling of agricultural wastes/byproducts: A country Report. New Delhi: Department of Science and Technology.
- Valverde, S., Lopez, J. C., Rabanal, R. M., & Escudero, J. (1986). Reactions of abietic acid methyl ester with m-chloroperbenzoic acid. *Tetrahedron*, 42(2), 573-582. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)87456-1](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)87456-1)
- Vogler, E. A. (1998). Structure and reactivity of water at biomaterial surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 74(1–3), 69–117. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(97\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(97)00040-7)
- Wang, J., Yao, K., Korich, A. L., Li, S., Ma, S., Ploehn, H. J. ... & Tang, C. (2011). Combining renewable gum rosin and lignin: Towards hydrophobic polymer composites by controlled polymerization. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 49(17), 3728-3738. <https://doi.org/10.1002/pola.24809>
- Wang, S., Sun, P., Xu, X., Liu, H., Wang, D., & Huang, X. (2022). Rosin-Based Si/P-Containing Flame Retardant Toward Enhanced Fire Safety Polyurethane Foam. *Advanced Engineering Materials*, 24(4), 2101044. <https://doi.org/10.1002/adem.202101044>
- Wang, W., Martin, J. C., Fan, X., Han, A., Luo, Z., & Sun, L. (2012). Silica nanoparticles and frameworks from rice husk biomass. *ACS applied materials & interfaces*, 4(2), 977-981. <https://doi.org/10.1021/am201619u>
- Wilbon, P. A., Chu, F., & Tang, C. (2013). Progress in renewable polymers from natural terpenes, terpenoids, and rosin. *Macromolecular rapid communications*, 34(1), 8-37. <https://doi.org/10.1002/marc.201200513>
- Wiyono, B., & Tachibana, S. (2008). Maleo- and fumaro-pimaric acids synthesized from Indonesian Pinus merkusii rosin and their sizing properties. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(15), 1884–1892. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1884.1892>
- Wu, H., Xiao, Z., Li, C., Li, J., & Chu, F. (2016). Rosin-nanosilica hybrid materials: Preparation and properties. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(7), 7064-7068. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.11390>

- Xue, B., Jin, L., Chen, Z., Zhu, Y., Wang, Z., Liu, X., & Wang, X. (2019). The template effect of silica in rice husk for efficient synthesis of the activated carbon based electrode material. *Journal of Alloys and Compounds*, 789, 777-784. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.012>
- Yadav, B. K., Gidwani, B., & Vyas, A. (2016). Rosin: Recent advances and potential applications in novel drug delivery system. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 31(2), 111–126. <https://doi.org/10.1177/0883911515601867>
- Yalcin, N., & Sevinc, V. (2001). Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics international*, 27(2), 219-224. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00068-7)
- Yang, X., Jiang, Z., Liu, H., Zhang, H., Xu, X., Shang, S., & Song, Z. (2021). Performance improvement of rosin-based room temperature vulcanized silicone rubber using nanofiller fumed silica. *Polymer Degradation and Stability*, 183, 109422. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109422>
- Yao, K., & Tang, C. (2013). Controlled polymerization of next-generation renewable monomers and beyond. *Macromolecules*, 46(5), 1689-1712. <https://doi.org/10.1021/ma3019574>
- Zhang, H., Zhao, X., Ding, X., Lei, H., Chen, X., An, D., ... & Wang, Z. (2010). A study on the consecutive preparation of d-xylose and pure superfine silica from rice husk. *Bioresource technology*, 101(4), 1263-1267. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.045>
- Zheng, Y., Yao, K., Lee, J., Chandler, D., Wang, J., Wang, C. ... & Tang, C. (2010). Well-defined renewable polymers derived from gum rosin. *Macromolecules*, 43(14), 5922. <https://doi.org/10.1021/ma101071p>
- Zhu, E. Q., Xu, G. F., Sun, S. F., Yang, J., Yang, H. Y., Wang, D. W., ... & Deng, J. (2021). Rosin acid modification of bamboo powder and thermoplasticity of its products based on hydrothermal pretreatment. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(3), 584-590. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00266-5>
- Zhu, Y., Romain, C., & Williams, C. K. (2016). Sustainable polymers from renewable resources. *Nature*, 540(7633), 354-362. <https://doi.org/10.1038/nature21001>

ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA

μm: micrómetro

2θ: ángulo de dispersión

ASTM: sociedad americana para pruebas y materiales

ATR: reflectancia total atenuada

B: biosílice

Bhx: biosílice hidroxilada

C: carbono

CA: cáscara de arroz

CB: colofonia-biosílice

Chx: colofonia hidroxilada

EDS: espectrómetro de energía dispersiva

FTIR: espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

h: Hora

HCA: harina de cáscara de arroz

HCl: ácido clorhídrico

IR: infrarrojo

kg: kilogramo

KOH: hidróxido de Potasio

MC: material compuesto

MEB: microscopia electrónica de barrido

min: minuto

mL: microlitro

O: oxígeno

PE: polietileno

PET: tereftalato de polietileno

PP: polipropileno

PS: poliestireno

PVC: policloruro de vinilo

RH: humedad relativa

SEMARNAT: secretaría de medio ambiente y recursos naturales

Si: silicio

SiO₂: dióxido de silicio

t: tiempo

t: tonelada

T_{5%}: temperatura de pérdida de peso del 5%

TGA: análisis termogravimétrico

T_{max}: temperatura de pérdida máxima de peso

VIII. ANEXOS: PUBLICACIONES Y CONGRESO

Fecha	Revista	Título
Agosto de 2025	ChemistrySelect	Evaluating the Effect of Biosilica on the Properties of Rosin-Based Eco-Friendly Flame Retardants
Enero de 2026	MRS Advances	Properties of sustainable compounds based on rosin and rice husk

Fecha	Congreso	Tema	Modalidad
17 – 21 de Agt. 2025	IMRC 33rd	Properties of sustainable compounds based on rosin and rice husk	Poster
24 – 27 de Abril 2023	CIM XVIII	Desarrollo de un material compuesto a partir de Colofonia/Biosílice	Oral
17 – 19 de Mayo 2023	EPMC XX	Producción de biosílice amorfa de cáscara de arroz para su empleo como refuerzo en compósitos	Poster
30 May - 2 Jun. 2023	AMIDIQ XLIV	Nuevo plástico a base de resina de Pino-Biosílice	Oral
13-18 de Agt. 2023	IMRC 31st	Obtention and analysis of a new Flame-retardant plastic based on rosin and biosilica	Poster
16 - 18 de Agt. 2023	CIIQ V	Obtención de un biocompuesto a base de Colofonia-Biosilice	Poster
4 - 6 de Oct. 2023	18° CCTI	Elaboración de un compósito sostenible a base de colofonia y cáscara de arroz	Cartel
14 – 15 de Mar. 2022	CIM XVII	Material compuesto basado en colofonia y biosílice: estudio de las propiedades físicas y térmicas	Ponencia
14 – 19 de Agt. 2022	IMRC XXX	Physical characteristics of Biocomposites based on rosin and biosilica	Poster
23 – 26 de Agt. 2022	AMIDIQ XLIII	Análisis morfológico del material compuesto a base de colofonia-biosílice	Cartel
15 – 20 de Agt. 2021	IMRC XXIX	Interface association between Rosin and biosilica of rice husk	Poster
08 – 11 de Sept. 2021	AMIDIQ XLII	Material compuesto a base de colofonia como matriz polimérica y biosílice de la cáscara de arroz como refuerzo	Cartel
20 – 22 de Oct. 2021	16° CNCTI	Material compuesto a partir de colofonia y biosílice de Cáscara de arroz	Ponencia
22 – 24 de Oct. 2020	AMIDIQ XLI	Caracterización de un eco-surfactante a base de colofonia y su estabilidad en emulsiones agua/aceite	Cartel
28 – 30 de Oct. 2020	15° CNCTI	Condiciones químicas y térmicas del compuesto colofonia/biosílice	Ponencia
23 – 26 de Nov. 2020	CIM XV	Material compuesto a base de biosílice de cáscara de arroz/colofonia	Ponencia

Erica Arreola García

Material Compuesto a Base de Colofonia con Biosílíce de la Cáscara de Arroz Obtención y caracterización.pdf



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:579443307

Fecha de entrega

16 abr 2026, 1:00 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

16 abr 2026, 1:19 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Material Compuesto a Base de Colofonia con Biosílíce de la Cáscara de Arroz Obtención y caracte....pdf

Tamaño del archivo

4.3 MB

105 páginas

22.577 palabras

127.226 caracteres



Página 1 de 118 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid:::3117:579443307

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química	
Título del trabajo	Material Compuesto a Base de Colofonia con Biosílíce de la Cáscara de Arroz: Obtención y caracterización	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Erica Arreola García	1051569k@umich.mx
Director	Salomón Ramiro Vásquez García	salomon.vasquez@umich.mx
Codirector	Nelly Flores Ramírez	nelly.flores@umich.mx
Coordinador del programa	Javier Lara Romero	lararom@umich.mx

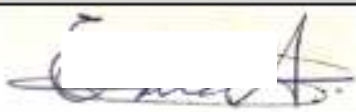
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Erica Arreola García 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 16 de abril de 2026