

ORIGINAL

Bamboo cellulose composite flame-retardant filament for 3D printing

Filamento ignífugo celulosa de bambú compuesto para impresión 3D

Willam Ricardo Esparza Encalada¹  , Wilson Adrian Herrera Villarreal¹  , Betty Alexandra Jaramillo Tituaña²  , Pamela Estefanía Naranjo Chávez³  

¹Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador.

²Instituto Superior Tecnológico Tena, Administración. Tena, Ecuador.

³Textiles Fench, Gerencia. Quito, Ecuador.

Citar como: Esparza Encalada WR, Herrera Villarreal WA, Jaramillo Tituaña BA, Naranjo Chávez PE. Bamboo cellulose composite flame-retardant filament for 3D printing. Data and Metadata. 2025; 4:192. <https://doi.org/10.56294/dm2025192>

Enviado: 02-08-2025

Revisado: 08-10-2025

Aceptado: 13-12-2025

Publicado: 14-12-2025

Editor: Dr. Adrián Alejandro Vitón Castillo 

Autor para la correspondencia: Willam Ricardo Esparza Encalada 

ABSTRACT

To find sustainable alternatives to traditional polymers, this study evaluated the potential of bamboo cellulose for the manufacture of flame-retardant filaments intended for 3D printing. Blending of five bamboo cellulose (BC)-based filament formulations was performed: S0 (C 5 %, AR 95 %), S1 (C 5 %, AR 90 %, U 0,4 %, B 4 %), S2 (C 4,8 %, AR 86,45 %, U 0,76 %, B 7. 68 %), S3 (C 5 %, AR 82 %, U 1 %, B 12 %) and S4 (C 5 %, AR 69 %, U 1 %, B 25 %). at 31,90C is left to stand for 30 min, 20 mL is placed inside the PET extruder and extruded through a 1 mm hole bamboo cellulose filament (BC). The results obtained using PAST 4 software revealed a normality of 95 % in the data. The extruded filament titer (T) showed an average of 1,88 Ktex with no significant differences between formulations ($P>0,05$). Regarding combustion (C), samples S0 and S4 reached the lowest times, both 32 seconds. Regarding incandescence (I), a significant decrease in time was observed, from a maximum of 24,333 seconds in sample S0 to a minimum of 1,333 seconds in sample S4, representing a reduction of 94,521 %. This behavior is attributed to the increase of urea (U) and borax (B) in the formulations. It is concluded that bamboo cellulose exhibits excellent flame-retardant properties and is suitable for processing in 3D printers.

Keywords: Bamboo Cellulose Composite; Flame-Retardant Filament; Print 3D.

RESUMEN

Con el objetivo de encontrar alternativas sostenibles a los polímeros tradicionales, este estudio evaluó el potencial de la celulosa de bambú para la fabricación de filamentos ignífugos destinados a la impresión 3D. Se realizó la mezcla de cinco formulaciones de filamento a base de celulosa de bambú (BC): S0 (C 5 %, AR 95 %), S1 (C 5 %, AR 90 %, U 0,4 %, B 4 %), S2 (C 4,8 %, AR 86,45 %, U 0,76 %, B 7,68 %), S3 (C 5 %, AR 82 %, U 1 %, B 12 %) y S4 (C 5 %, AR 69 %, U 1 %, B 25 %). a 31,90C se deja reposar 30 min, se coloca al interior del extrusor PET 20 mL se extruye por un orificio de 1 mm filamento de celulosa de bambú (BC). Los resultados obtenidos mediante el software PAST 4, revelaron una normalidad en los datos del 95 %. El título (T) del filamento extruido presentó un promedio de 1,88 Ktex sin diferencias significativas entre las formulaciones ($P>0,05$). En cuanto a la combustión (C), las muestras S0 y S4 alcanzaron los tiempos más bajos, ambos de 32 segundos. Respecto a la incandescencia (I), se observó una disminución significativa en el tiempo, desde un máximo de 24,333 segundos en la muestra S0 hasta un mínimo de 1,333 segundos en la muestra S4, lo que representa una reducción del 94,521 %. Este comportamiento se atribuye al aumento de urea (U) y bórax (B) en las formulaciones. Se concluye que la celulosa de bambú presenta excelentes propiedades ignífugas y es adecuada para el procesamiento en impresoras 3D.

Palabras clave: Compuesto de Celulosa de Bambú; Filamento Ignífugo; Impresión 3D.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales ignífugos es un área de interés constante en la industria y la investigación, con el objetivo de mejorar la seguridad y la resistencia al fuego en diversos productos y aplicaciones. En este contexto, los materiales compuestos se destacan como una opción prometedora debido a su capacidad para combinar las propiedades específicas de diferentes componentes y lograr un rendimiento superior. Además, la integración de materiales naturales sostenibles en la fabricación de compuestos ha surgido como una tendencia importante en la búsqueda de soluciones más ecológicas. El bambú, conocido por su rápido crecimiento y sostenibilidad es un material sostenible y ecológico⁽¹⁾ presenta propiedades mecánicas y térmicas excepcionales que lo convierten en un candidato ideal para mejorar los materiales compuestos tradicionales. Entre sus derivados, la celulosa de bambú “*Angustifolia*” se destaca por sus características especiales y biodegradables, lo que la hace especialmente adecuada para su uso en la impresión 3D. Esta celulosa no solo ofrece una alternativa sostenible, sino que también contribuye a la creación de compuestos con propiedades ignífugas mejoradas.

El bambú es un material de construcción natural que se puede encontrar en las regiones tropicales templadas. Se ha utilizado desde la antigüedad por su fuerza natural y flexibilidad como un material duradero.⁽²⁾ es abundante y sostenible en los trópicos y subtrópicos. Debido a un crecimiento más rápido una rotación más corta y una mayor resistencia mecánica en comparación con otras especies, ha generado cada vez más atención por sus valores económicos y ambientales.⁽³⁾ La utilización del bambú es vital para promover un desarrollo bajo en carbono.⁽⁴⁾ Como material de biomasa natural el bambú está sujeto a variaciones en el tamaño del tallo, así como en las propiedades físicas y mecánicas que influyen sustancialmente en el procesamiento y la calidad del producto.⁽⁵⁾ Las propiedades de compresión longitudinal y relación tensión-deformación del bambú mediante la compresión uniaxial indican que la falla del bambú es por abombamiento, y su resistencia máxima a la compresión aumenta linealmente con la altura en la caña del bambú.⁽⁶⁾ se desarrolla diversos métodos y materiales empleando diversos productos químicos formando compuestos ignífugos que cambian su estructura con aplicaciones industriales en diferentes áreas como materiales funcionales, telas o fibras ignífugas, además suelen destruir la resistencia mecánica debido a la introducción de retardantes de llama empleando fosfito de metilo de 1,3-dimetil imidazolio líquido iónico, con un solvente y modificador, para fabricar celulosa fosforilada.⁽⁷⁾ mientras que el sulfonato de lignina de sodio (SLS) y el extracto de cáscara de granada (PRE) aplicando al tejido de algodón celulósico revelo que durante el tratamiento, actuaron de forma combinada para retardar la llama (para detener la llama y el resplandor).⁽⁸⁾ Además, utilizando materias primas recicladas, residuos agroindustriales y aglutinantes proteicos se elaboraron tableros de celulosa resistente al fuego con baja densidad y adecuada resistencia a la flexión utilizando desechos de periódicos, proteína de soya, ácido bórico y bórax.⁽⁹⁾ Los filamentos de bambú deben tratarse con retardantes de llama como (ácido bórico/bórax = 1:1) aumentando claramente a medida que aumenta la duración del tratamiento temperatura o la concentración de la solución. Comparado con no tratado y tratado con ultravioleta.⁽¹⁰⁾ El comportamiento mecánico térmico y químico de la superficie ayuda en el proceso de fabricación de bambú compuesto y granulado. En este estudio, el bambú moso fue tratado con solución de hidrato de sodio y solución de ácido acético.⁽¹¹⁾ Además, se desarrolló fibras naturales resistentes al fuego a través del recubrimiento de superficies con bioquímicos ecológicos, bicarbonato de sodio y polifosfato de amonio, disolviendo 3 % y 6 % en peso en un medio acuoso en fibras de bambú.⁽¹²⁾ La combustibilidad de las muestras se determinó limitando el índice de oxígeno (LOI).⁽¹³⁾ Determinando el grado de combustión que soporta al estar expuesto al fuego. Los nanocompuestos de arcilla polimérica procesados por fusión con contenido de arcilla suele ser inferior al 5 % en peso agregando partículas de plaquetas de arcilla caolinita se produjo híbridos inorgánicos con un alto contenido de nano celulosa, nanoarcilla.⁽¹⁴⁾ Además se preparó y laminó un hidrogel TN compuesto de poli (N-isopropilacrilamida) (PNIPAAm)/alginato de sodio (SA)/poli (alcohol vinílico) (PVA) con una relación SA: PVA de 2:1 para mejorar el rendimiento resistente al fuego de la tela de celulosa.⁽¹⁵⁾

Otro de los productos útiles como retardante al fuego es la urea. Se utiliza en la agricultura, alimentación y la industria, es combustible potencial a gran escala pero la producción depende de combustibles fósiles como fuentes de energía renovables, existiendo una alternativa potencial para la conversión de biomasa a urea.⁽¹⁶⁾ La importancia de urea es en el suministro del nitrógeno (N) requerido.⁽¹⁷⁾ en los procesos industriales donde es necesario la utilización de resinas y gomas para formar la emulsión con los materiales a mezclar como, los polímeros renovables y naturales como polisacáridos tienen un enorme potencial, la goma xantana es polímero natural para utilizar reemplazando a los estabilizadores colocando 0,5 % y 1 % como coloide para la síntesis de adhesivos.⁽¹⁸⁾ Se produce goma xantana utilizando caldo de caña de azúcar diluido en 24 h. utilizando en g/L: 27,0 sacarosa; 2,0 Levadura de cerveza; y 0,8 NH₄NO₃. La mezcla se fermentó a 750 rpm y 0,35 vvm.⁽¹⁹⁾ Las gomas hidrolizadas con ácidos y bases exhibieron una estructura cristalina indicaron un aumento

en la cristalinidad, en consecuencia la goma xantana podría modificarse para aumentar sus aplicaciones sin alterar su integridad y estructura básica.⁽²⁰⁾ Para determinar las interacciones entre polímero aniónico-goma xantana y tensioactivo aniónico, expresan relación I-1/I-3 confirmaron las interacciones entre goma xantana y los surfactantes examinados principalmente a través de la interacción hidrofóbica y mediante la creación de enlaces de hidrógeno.⁽²¹⁾

Se debe tomar en cuenta los productos ignífugos o retardantes al fuego que ayudan a que la combustión se extinga como, los retardantes de fuego que contienen ácido bórico o bórax redujeron la liberación de calor y humo del filamento de bambú. El efecto sinérgico podría obtenerse mediante una mezcla de una proporción razonable de ácido bórico: bórax = 1:1.⁽²²⁾ Además los resultados mostraron que el tratamiento de inmersión en baño frío y caliente en condiciones de 20 °C/2 h y 100 °C/2 h con 3 ciclos, acelera los porcentajes de carga de boro en los filamentos de bambú.⁽²³⁾ Normalmente se utiliza para impresoras 3D filamentos sintéticos a base de hidrocarburos aromáticos como polyester, nylon etc. Que contaminan el ambiente, mientras los filamentos a base de ácido poliláctico (PLA) biodegradables provenientes derivados de fuentes vegetales como el maíz biodegradable, y también, la fibra de carbono reciclada corta (rCF) de tamaño reducido en una matriz de ácido poliláctico (PLA) para la impresión por modelado por deposición fundida (FDM), mientras los filamentos compuestos se produjeron mediante mezcla con molino de bolas y luego extrusión por fusión.⁽²⁴⁾ El tratamiento de las fibras *Trichosanthes Cucumerina*, se realizó utilizando silano al 6 % encontrando mejor resistencia a la tracción de 63,5 MPa con mejor distribución de fibras, el filamento de PLA /reforzado se puede utilizar para preparar componentes biodegradables.⁽²⁵⁾ Como filamentos biológicos innovadores utilizando partículas lignocelulósicas naturales de la corteza de la planta *Morinda citrifolia* L. Como refuerzo mostraron mejoras a temperatura elevada de transición vítrea y la estabilidad estructural reduciendo el riesgo de deformación en la impresión de PLA.⁽²⁶⁾ Existe materiales compuestos fabricados con filamento de PLA relleno de bambú mediante el modelado por deposición fundida FDM. Mejora las propiedades del PLA y alargar su vida útil.⁽²⁷⁾

Con la adición de aditivos orgánicos, inorgánicos o minerales se ha desarrollado compuestos con materiales como laminados, hilos, filamentos con características ignífugas que en algunos casos se origina. Como un efecto de flujo que se produce en la extrusión de polímeros mediante el cual el material experimenta tensiones rápidas y cambios dimensionales al salir del orificio de la boquilla.⁽²⁸⁾ Las fibras celulósicas artificiales como la viscosa y el modal, pueden hacerse resistentes a las llamas (FR) incluyendo un aditivo FR organofosfato en partículas sólidas en la solución de celulosa antes de la extrusión de la fibra.⁽²⁹⁾ Para la formación de polímeros biodegradables con propiedades ignífugas en su mayoría son a base monómeros que conforman un compuesto polimérico que alteran las propiedades como: La modificación del ácido fosfórico contribuye a la formación de grupos funcionales específicos en la superficie del carbón de bambú, lo que culmina en el aumento de sus capacidades de adsorción.⁽³⁰⁾ Donde la resistencia en húmedo del papel aumentó después del tratamiento con la solución de ácido fosfórico y urea 1:3 concentraciones 1,2 a 2,5 M y 3,7 a 7,5 M respectivamente, tiempo y temperatura 1,5 h y 140 °C.⁽³¹⁾ Este procedimiento es aplicable en celulosa de bambú por ser utilizado en papel mejorando las propiedades. El ácido fosfórico puede actuar como donante y aceptor de protones simultáneamente, por lo tanto, es capaz de activar ambos sustratos.⁽³²⁾ En membranas se encontró que las membranas de polibencimidazol (PBI) plasmático dopado con ácido fosfórico (PA) presentan niveles de dopaje de PA más altos, una mayor conductividad de protones y una mejor capacidad de retención de PA.⁽³³⁾

Con los diversos polímeros formados en filamentos continuos con diferentes propiedades y características son aplicados en la impresión 3D, obtenidos a partir de los residuos recuperados de aparatos eléctricos y electrónicos (los llamados RAEE o e-waste), recuperando de pequeños electrodomésticos (principalmente compuesto de polipropileno relleno con partículas de talco) formando filamentos adecuados para procesos de impresión 3D de fabricación de filamentos fundidos (FFF).⁽³⁴⁾ Además la capacidad de producir material de sutura utilizando tecnología de impresión tridimensional (3D) de nylon WeGo 3-0 comercial y filamento de impresión 3D de nylon Se observó significación estadística en la resistencia a la tracción máxima de la sutura.⁽³⁵⁾ Más respetuosos con el medio ambiente y sostenibles, el estudio evalúa el efecto incorporando nanopartículas de nervadura central de palma (DPFNP) para reforzar una matriz de polietileno de alta densidad (HDPE) con 10, 20, 30, 40 y 50 % en peso.⁽³⁶⁾ Además se produjeron bio compuestos para impresión 3D mediante poli(ácido láctico) (PLA) como matriz polimérica e hidroxiapatita (HAP) como relleno de refuerzo para uso en aplicaciones biomédicas concluyendo que la estabilidad térmica de los bio compuestos aumentó en comparación con el PLA puro.⁽³⁷⁾

MÉTODO

Para establecer el procedimiento empleado en la obtención de filamento ignífugo a base de celulosa de bambú compuesto, se aplicó la norma basada en las características del filamento producido. Específicamente la norma ISO 15025: 2000, que indica el método de prueba para determinar la propagación de la llama.

Materiales y equipos

- Base de celulosa de bambú
- Urea: Polvo o cristales color blanco olor casi inodoro, peso específico 1,335
- Bicarbonato de sodio en polvo
- Resina aniónica, color blanco viscoso
- Bórax: Cristales o polvos blancos, inodoro, peso específico 1,815g
- Flexi Burn: James Heal: Modelo 780, Gas: Mezcla Butano/Propano gas comercial, Monofásica 230V $\pm 15\%$ (500W) 50/60Hz, Ancho 60,7cm, Profundidad 86,6cm, Altura 185,5cm
- Balanza digital: 0,01g
- Recipiente
- Varilla agitadora: Vidrio
- Extrusor manual polyester (PET) 20 mL
- Termómetro laser rango -50 a 500°C
- Calibrador en mm

Proceso

En la figura 1 se muestra el proceso metodológico para obtener filamento de celulosa de bambú ignífugo con diferentes productos y concentraciones.

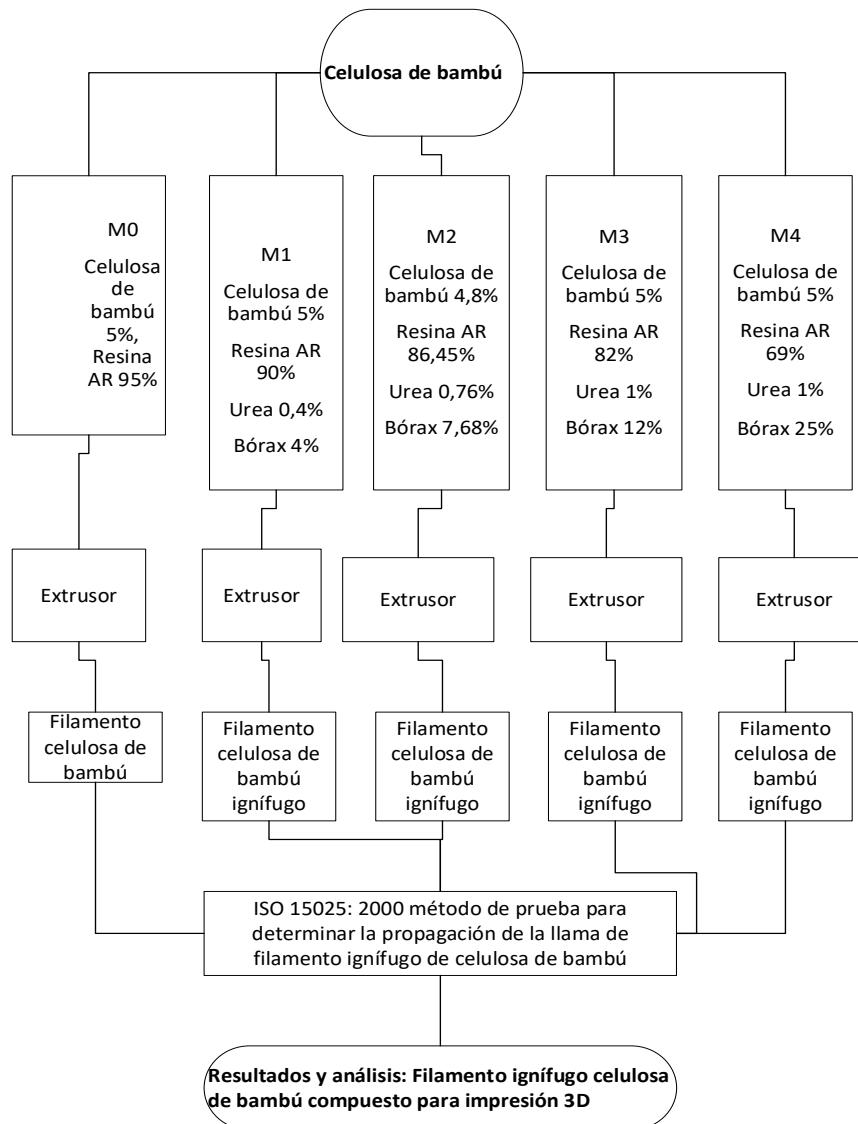


Figura 1. Flujograma general de obtención de filamento compuesto de celulosa de bambú ignífugo

La formación del filamento ignífugo de bambú comienza con la extracción de celulosa de chips de bambú con tamaño promedio de 1,5 cm. Este proceso se realiza mediante un proceso kraft alcalino utilizando hidróxido de

sodio en escamas, lo que resulta en un 48 % de celulosa de bambú (BC) filtrada eliminando lignina y el exceso de hidróxido de sodio mediante lavado. Esta celulosa filtrada es el punto de partida para la fabricación del filamento mediante las mezclas de estudio de las muestras (S0 a S4), clasificadas en cuatro variables para su formación en filamento.

S0: Celulosa de bambú 5 %, resina aniónica 95 %.

S1: Celulosa de bambú 5 %, resina aniónica 90 %, Urea 0,4 %, bórax 4 %.

S2: Celulosa de bambú 4,8 %, resina aniónica 86,45 %, Urea 0,76 %, bórax 7,68 %.

S3: Celulosa de bambú 5 %, resina aniónica 82 %, Urea 1 %, bórax 12 %.

S4: Celulosa de bambú 5 %, resina aniónica 69 %, Urea 1 %, bórax 25 %.

Para preparar las mezclas, los productos fueron pesados en una balanza digital rango 0,01 según los porcentajes de las fórmulas de S0 a S4 utilizando los productos de celulosa de bambú (BC), resina aniónica (AR), Urea (U), Bórax (BX) a temperatura de 31,9 °C, se mezcló en un recipiente PET de 100mL agitando manualmente por medio de una varilla, hasta que la solución este homogénea adquiriendo una tonalidad amarillenta viscosa, Este polímero natural desarrollado se deja reposar por 30 minutos y posteriormente es colocado por el extremo de una jeringa de polyester PET 20 mL con dimensiones de 15 cm de longitud, diámetro 2 cm y al otro extremo se encuentra un orificio de 1mm de diámetro, una vez lleno el extrusor con la mezcla, se aplica manualmente una fuerza, se comprime y lentamente brota el filamento de celulosa de bambú sobre una superficie de hierro galvanizado y se deja secar a temperatura de 34,8 °C durante 30 minutos. El mismo procedimiento se llevó a cabo utilizando todas las muestras S0, S1, S2, S3 y S4 cambiando las concentraciones de los productos de acuerdo con los requerimientos Figura 2 (a-h). Posteriormente, las muestras elaboradas fueron analizadas mediante un equipo Flexi Burn James Heal normalizado figura 2 (i-q) con el método de prueba ISO 15025: 2000 para determinar la propagación de la llama indicada en la figura 2.

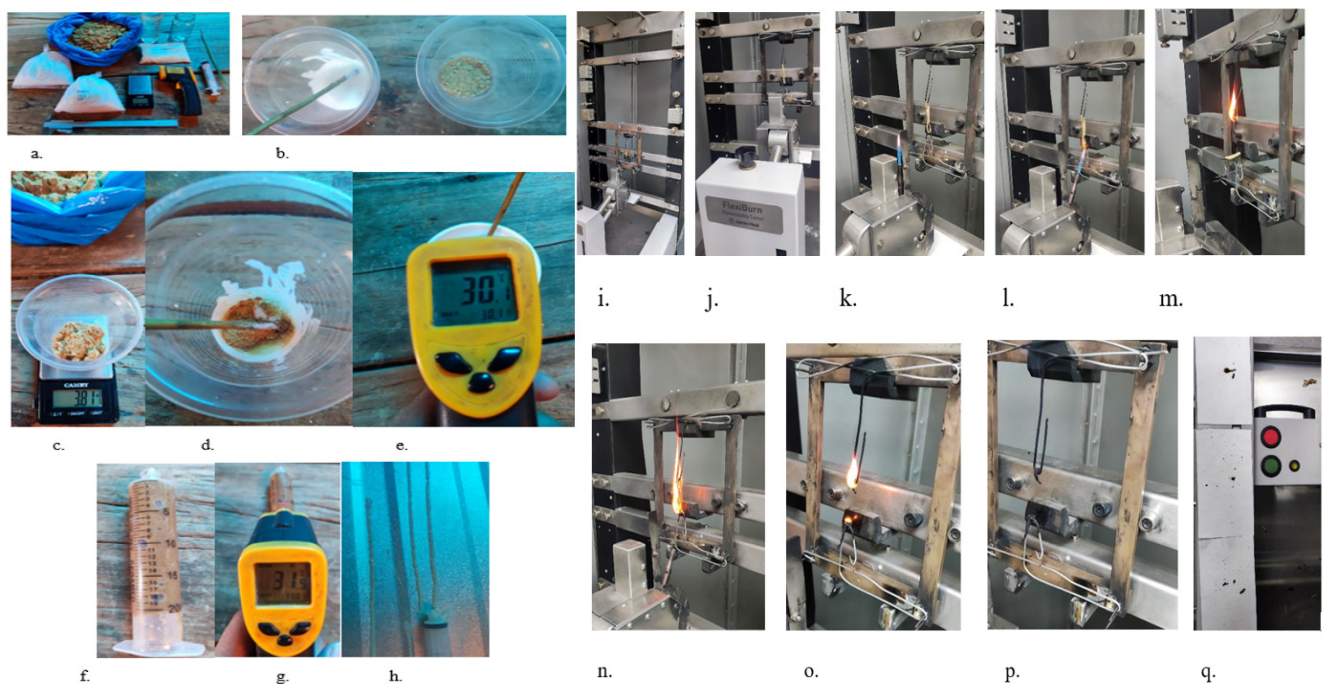


Figura 2. Materiales y equipos del proceso de elaboración de filamento ignífugo de celulosa de bambú y Prueba en el Flexi Burn para determinar la propagación de la llama.

(a) productos para la formación de filamento BC-AR-U-B-SB, (b) resina aniónica AR Y BC, (c) celulosa de bambú BC, (d) mezcla de BC-AR-U-B-SB, (e) termómetro con temperatura de la mezcla, (f) extrusor con mezcla de BC-AR-U-B-SB, (g) temperatura de la mezcla a extruir, (h) filamento ignífugo extruido, (i) equipo Flexi Burn: James Heal, (j) colocar la muestra de BC, (k) encendido del equipo, (l) inicio combustión, (m) combustión, (n) aumento de combustión, (o) termina la combustión, (p) incandescencia, (q) desprendimiento de residuos sobre papel filtro.

RESULTADOS

Realizado la extrusión del filamento de BC, se lleva a cabo la tabulación de datos aplicado los supuestos de normalidad de los datos encontrados, con pruebas paramétricas a los valores que cumplen y paramétricas (ANOVA-Kruskal-Wallis) para los que no cumplen. Además, para determinar la propagación de la llama; se aplicó la norma ISO 15025: 2000 método de prueba para determinar la propagación de la llama detallada en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de obtención de filamento continuo ignifugo celulosa de bambú

Muestra	Título Ktex (g/m)	Combustión (s)	Incandescencia (s)	Bordes (B)	Incandescencia más allá del área (IBA)	Desprendimiento residuos (WD)	Desprendimiento inflaman papel filtro (DSP)	Forma agujero frontal e inferior (FBS)
S0	1,44	25,00	18,00	Si	Si	No	No	Si
S0	1,49	37,00	14,00	Si	Si	No	No	Si
S0	1,41	34,00	41,00	Si	Si	No	No	Si
S1	1,35	8,00	4,00	Si	No	Si	No	Si
S1	1,44	58,00	4,00	Si	No	Si	No	Si
S1	1,38	48,00	3,00	Si	No	Si	No	Si
S2	1,59	55,00	4,00	Si	No	No	No	Si
S2	1,46	42,00	3,00	Si	No	No	No	Si
S2	1,45	40,00	6,00	Si	No	No	No	Si
S3	2,10	22,00	1,00	Si	No	Si	No	Si
S3	2,37	35,00	3,00	Si	No	Si	No	Si
S3	2,52	55,00	1,00	Si	No	Si	No	Si
S4	2,53	30,00	2,00	Si	No	Si	No	Si
S4	2,41	38,00	1,00	Si	No	Si	No	Si
S4	3,30	29,00	1,00	Si	No	Si	No	Si

DISCUSIÓN

Analizando el gráfico box plot figura 3 se encuentra que, el filamento de BC al extruir tiene un T promedio Ktex 1,882 g/m (CV=32,229) indicando irregularidades en su longitud con una incertidumbre (+- 0,156) ocasionado por la fuerza manual ejercida en el extrusor que no es controlada uniformemente, se encuentra dentro de lo normal y no tiene diferencias significativas entre las concentraciones de las muestras S0 a S4 ($P>0,05$), mientras en la C indica (CV=36,630) revelando que existe un rango mínimo entre 8 segundos y máximo 58 segundos de combustión C ($P>0,05$), alcanzando un promedio 37,066 s antes de extinguirse el fuego con una incertidumbre de (+-3,505), estos valores coinciden con estudios anteriores realizados en el tiempo de combustión de la llama donde disminuyó de 52 s a 40 s, disminuyeron significativamente un 21,0 % y un 22,2 % respectivamente.⁽³⁸⁾, Por el contrario ocurre con la incandescencia I (CV=149,899) entre las muestras, tiene una incertidumbre (+- 2,735), hallando diferencias significativas ($P<0,05$), con C se obtienen valores atípicos durante la combustión (CV=84,515) con una incertidumbre (+-0,130) en las muestras S0 de filamento BC sin la propiedad ignífuga en relación con las muestras S1, S2, S3, S4 existiendo diferencias significativas ($P<0,05$). Con respecto al parámetro B forma agujeros frontal e inferior FBS indicando que todas las muestras analizadas se extinguen en toda su extensión de los filamentos de prueba sin DSP colocado en la parte inferior del equipo Flexi Burn, además en IBA se observa la muestra S0 de base al estar sometida a una C se extingue en su totalidad con un tiempo promedio 24,333 s en relación de las otras muestras, manteniendo una diferencia significativa entre ellas mostrando ($P<0,05$) entre las medias de las muestras figura 3a. En la figura 4b se puede observar que, el T Ktex (CV=32,229) tiene una mínima variación ($P>0,05$) mostrando que, su regularidad es homogénea g/m al extruir el filamento, existe una incertidumbre de (+- 0,0156) en todas sus S. Con respecto al parámetro C, al incorporar en su mezcla BX a partir del 4 % a 25 %, U del 0,4 % a 1 %, disminuyendo AR 95 % a 69 % y manteniendo 5 % de bambú, se observa que existe una tendencia aumentar hasta alcanzar el pico más alto con 58 s con la muestra S1, un ligero descenso en la muestra S2, y aumento en la S3 para culminar con un descenso hasta 29 s en la muestra S4, mostrando que al aumentar la U disminuye el tiempo de C, esto es ocasionado por, la urea que juega un papel vital; se descompone en amoníaco y ácido isociánico como retardante de llama entre fosfito/ urea y es menos agresivo.^{(39)185 °C} Además, la I tiene un elevado tiempo con 41 s desde S0 (CV=149,899) pero tiene tendencia a disminuir hasta S4 con 1 s como mínimo, es decir, es directamente proporcional entre C y I produciendo un filamento BC con propiedades ignífugas donde, la dependencia de la concentración de estos componentes muestra que, a concentraciones superiores, la interacción de las moléculas de urea puede estar relacionadas con el comportamiento inusual de soluciones presumiblemente como consecuencia de la agregación.⁽⁴⁰⁾ indicada en la figura 3b.

En el gráfico glustering figura 4 se encuentra diferencias significativas entre S0 ($P<0,05$) (BC 5 %, AR 95 %) con incertidumbre (+-2,135) en relación con la C y I, manteniendo constante el T, esto es ocasionado por el aumento hasta U 1 %, B 25 % en las muestras S1, S2, S3, S4, pero se observa que S4 (BC5 %, AR69 %, U1 %, B25 %) mantiene semejanzas entre ellos ($P>0,05$) en todos los parámetros S, T, C, I, B, IBA, DSP, FBS. Además, se observa que, a medida que aumenta el B en el instante de extruir se observa grumos en la mezcla provocando taponamiento en la salida del extrusor y formando un filamento BC con irregularidades en su longitud dificultando su extrusión ver figura 4.

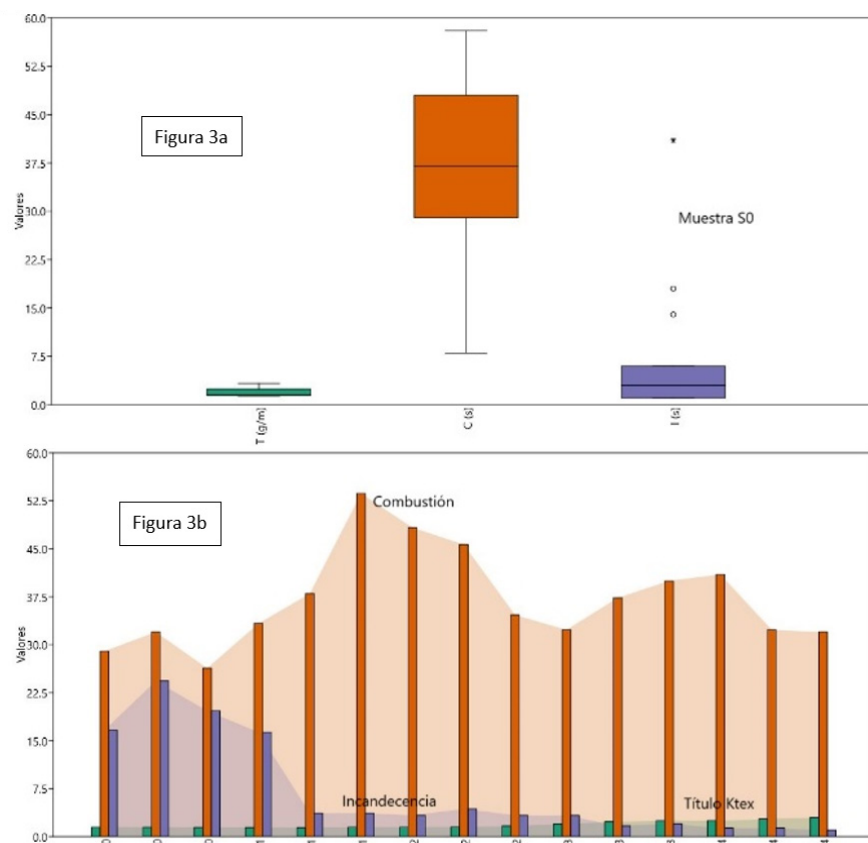


Figura 3. Gráfico box plot y Bar chat de variación con tendencias entre combustión (C), Incandescencia (I) y Título (T)

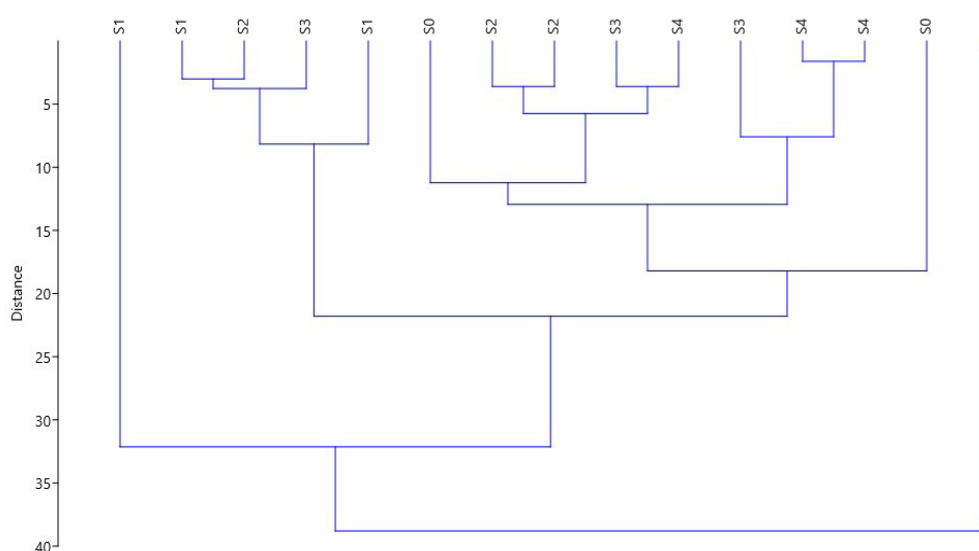


Figura 4. Glustering de distancias entre las muestras con diferentes concentraciones

Analizando el gráfico matrix plot de la figura 5 se encuentra que el T del filamento extruido tiene ($CV=32,229$) entre todas las variantes de las muestras S0 hasta S4 ($P>0,05$) existiendo una ligera diferencia en g/m que no influye en gran medida en los parámetros C y I. Mientras en las formulaciones con concentraciones diferentes al aumentar hasta U 1 % y B 25 % en las muestras S1 hasta S4, se encuentra que S0 (BC5 %, AR95 %), mantiene una ligera similitud con S4 (BC5 %, AR69 %, U1 %, B25 %) en la C ($P>0,05$), esta similitud se debe por la BC y AR que en su estructura son inflamables al entrar en contacto con el fuego, mientras las demás muestras S1 hasta S3 se mantienen con valores altos, es decir la U y B no influye en su capacidad de evitar la combustión en su totalidad manteniendo un promedio de 32 s similares en S0 y S4. La composición retardante de fuego de alta eficiencia con ácido fosfórico, ácido bórico, bórax, urea y sulfato de magnesio el índice de crecimiento del fuego de la madera (celulosa) tratada con retardante de fuego fue relativamente bajo.⁽⁴¹⁾ Por otro lado, la

I tiene una diferencia significativa ($P < 0,05$) entre S0 (BC5 %, AR95 %) y las demás muestras S, encontrando una disminución drástica en el tiempo de I, esto se debe a la incorporación de U y B con diferentes concentraciones. La muestra S4 (BC5 %, AR69 %, U1 %, B25 %) tiene los mejores resultados en I, pero en el proceso de extrusión se complica la obtención de filamento de CB ocasionando taponamiento en la salida provocando irregularidades en T de su masa por unidad de longitud (g/m), esto se origina porque, al aumentar al 25 % de bórax se produce cristales en su mezcla formando una mezcla heterogénea que dificulta su extrusión al momento de producir el filamento BC, pero descendiendo el tiempo de I, con concentraciones elevadas de bórax, de la fracción de gel de hidrogeles reticulados aumentó formando carbón en la superficie de la celulosa generando agua en contacto directo con la llama, provocando la ignición de la llama y retraso en la propagación.⁽⁴²⁾ indicado en la figura 5.

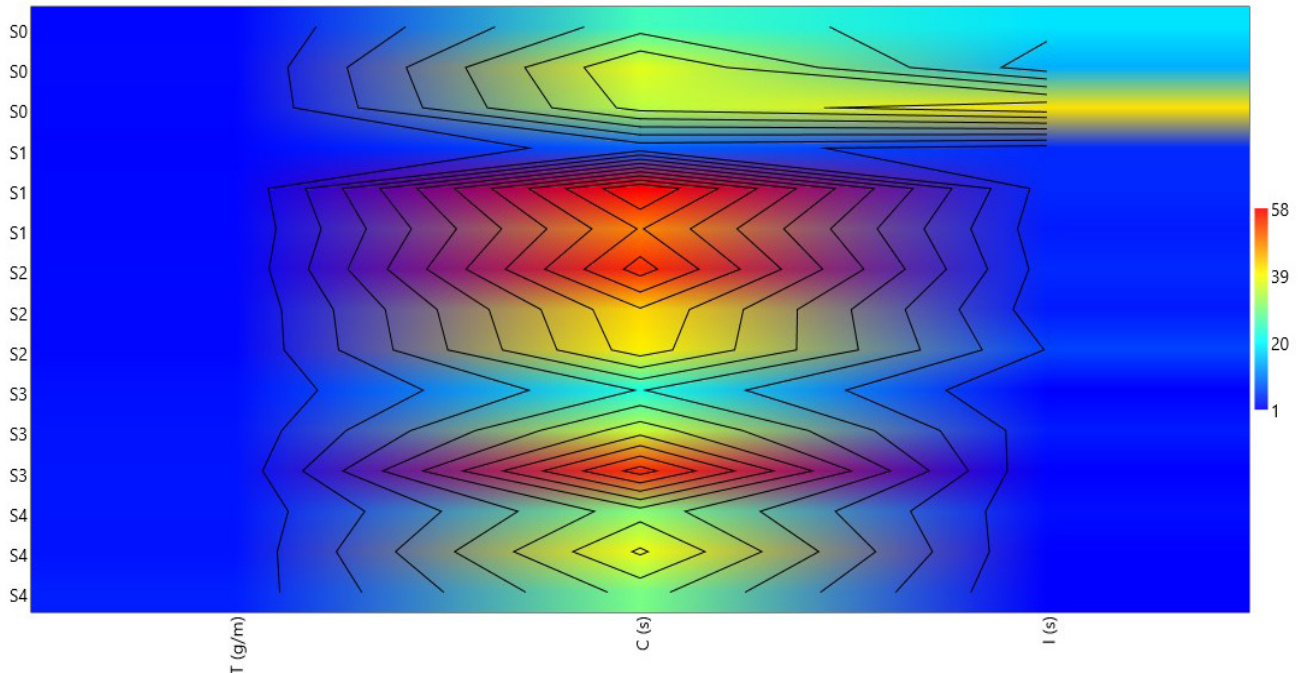


Figura 5. Gráfico matrix plot con máximos y mínimos propiedades ignífugas de celulosa de bambú BC

CONCLUSIONES

En el desarrollo de filamento ignífugo compuesto de celulosa de bambú para impresión 3D, se utilizaron cinco formulaciones distintas: S0 (C 5 %, AR 95 %), S1 (C 5 %, AR 90 %, U 0,4 %, B 4 %), S2 (C 4,8 %, AR 86,45 %, U 0,76 %, B 7,68 %), S3 (C 5 %, AR 82 %, U 1 %, B 12 %) y S4 (C 5 %, AR 69 %, U 1 %, B 25 %). Los resultados indicaron que el título (g/m) T del filamento extruido tiene un promedio de 1,88 Ktex ($CV=32,229$) entre todas las variantes de las muestras S0 hasta S4 ($P > 0,05$) existiendo una ligera diferencia en (g/m) que no influye en gran medida en los parámetros C y I, mientras en la combustión (C) con los promedios más bajos se encuentran en 32 segundos las muestras S0 y S4 siendo muy similares entre ellos. Con respecto a la incandescencia (I) los hallazgos indican que existe una tendencia a disminuir desde el promedio más alto con la muestra S0 24,333 segundos y mínimo la muestra S4 1,333 segundos, obteniendo 94,521 % menos tiempo ocasionado por el aumento de urea (U) a 1 % y bórax (B) a 25 %. Concluyen que el filamento de celulosa de bambú (BC) no solo posee excelentes propiedades ignífugas, sino que también es adecuado para aplicaciones en impresión 3D al ser extruido. La investigación sugiere que la celulosa de bambú es un material sostenible y seguro, ofreciendo una alternativa innovadora y eficaz para la fabricación de filamentos en la industria de la impresión 3D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pahuja V, Ghosh PK. Assessment of Bond Strength in Bamboo-Reinforced Concrete. *Int J Comput Exp Sci Eng*. 2024;10(4):1801-13. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.498>
2. Manandhar R, Kim JH, Kim JT. Environmental, social and economic sustainability of bamboo and bamboo-based construction materials in buildings. *J Asian Archit Build Eng*. 2019;18(2):49-59. <https://doi.org/10.1080/13467581.2019.1595629>
3. Fang CH, Jiang ZH, Sun ZJ, Liu HR, Zhang XB, Zhang R, et al. An overview on bamboo culm flattening. *Constr Build Mater*. 2018;171:65-74.

4. Yuan J, Chen L, Mi B, Lei Y, Yan L, Fei B. Synergistic effects of bamboo cells during shrinkage process. *Ind Crops Prod.* 2023;193:116232.
5. Zong Y, Chen X, Luo X, Su Q, Zhang X, Yan Y, et al. Effect of Bamboo Culm Grading on the Properties of Flattened Bamboo Boards. *Forests.* 2023;14(6):1254.
6. Zhou Q, Fu F, Li W, Liu P, Li J, Xu Y. Longitudinal compression constitutive model of original bamboo and buckling simulation of bamboo column. *Wood Mater Sci Eng.* 2023;18(3):910-8. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2087538>
7. Zhang Q, Chen J, Li D, Sun L, Ren Y, Cheng C, et al. Simultaneous enhancement of mechanical strength and flame retardancy of lyocell fiber via filling fire-resistant cellulose-based derivative. *Ind Crops Prod.* 2023;199:116757.
8. Basak S, Ali SW. Sodium Lignin Sulfonate (SLS) and Pomegranate Rind Extracts (PRE) Bio-macro-molecule: A Novel Composition for Making Fire Resistant Cellulose Polymer. *Combust Sci Technol.* 2022;194(15):3206-24.
9. Moreno P, Villamizar N, Perez J, Bayona A, Roman J, Moreno N, et al. Fire-resistant cellulose boards from waste newspaper, boric acid salts, and protein binders. *Clean Technol Environ Policy.* 2021;23(5):1537-46.
10. Yu LL, Lu F, Qin DC, Ren HQ, Fei BH. COMBUSTIBILITY OF BORON-CONTAINING FIRE RETARDANT TREATED BAMBOO FILAMENTS. *Wood Fiber Sci.* 2017;49(2):125-33.
11. Fei B, Liu Z, Jiang Z, Cai Z, Liu X, Yu Y. MECHANICAL PROPERTIES OF MOSO BAMBOO TREATED WITH CHEMICAL AGENTS. *Wood Fiber Sci.* 2013;45(1):34-41.
12. Prabhakar MN, Yu R, Lee DW, Song JI. Hybrid eco-friendly coating on bamboo fabric through Taguchi formulations for flame and thermal resistance. *Cellulose.* 2023;30(9):6065-80. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05242-4>
13. Hongqiang Q, Ming G. The combustibility of cotton cellulose and wool treated with flame-retardants. In: Huang P, Wang Y, Li SC, Zheng C, Mao ZH, editors. *Progress in Safety Science and Technology*, Vol 6, Pts A and B. 2006. p. 1430-4.
14. Castro DO, Karim Z, Medina L, Haggstrom JO, Carosio F, Svedberg A, et al. The use of a pilot-scale continuous paper process for fire retardant cellulose-kaolinite nanocomposites. *Compos Sci Technol.* 2018;162:215-24.
15. Yu Z, Liu J, He H, Ma S, Yao J. Flame-retardant PNIPAAm/sodium alginate/polyvinyl alcohol hydrogels used for fire-fighting application: Preparation and characteristic evaluations. *Carbohydr Polym.* 2021;255:117485.
16. Zhang H, Wang L, Van Herle J, Marechal F, Desideri U. Techno-economic comparison of 100% renewable urea production processes. *Appl Energy.* 2021;284:116386.
17. Solomon CM. Urea uptake and urease activity in the Chesapeake Bay. *J Mar Res.* 2019;77(1):139-68.
18. Gadhave RV, Vineeth SK. Synthesis and characterization of xanthan gum stabilized polyvinyl acetate-based wood adhesive. *Polym Bull.* 2023; [Epub ahead of print].
19. Faria S, de Oliveira Petkowicz CL, de Moraes SA, Hernandez Terrones MG, de Resende MM, de Franca FP, et al. Characterization of xanthan gum produced from sugar cane broth. *Carbohydr Polym.* 2011;86(2):469-76.
20. Khalid N, Zahoor T, Pasha I, Shahid M. RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION AND MICROSTRUCTURAL DEPICTION OF XANTHAN GUM AND ITS HYDROLYSATES. *Pak J Agric Sci.* 2020;57(2):561-71.
21. Krstonosic V, Milanovic M, Dokic L. Application of different techniques in the determination of xanthan gum-SDS and xanthan gum-Tween 80 interaction. *Food Hydrocoll.* 2019;87:108-18.
22. Yu L, Cai J, Li H, Lu F, Qin D, Fei B. Effects of boric acid and/or borax treatments on the fire resistance

of bamboo filament. *BioResources*. 2017;12(3):5296-307.

23. Li C, Zhou X, Yang C, Li H, Yu L, Fei B. Effects of different flame retardant treatments on the combustibility of bamboo filament. *Wood Res*. 2021;66(2):255-65.

24. Saleh M, Anwar S, AlFaify AY, Al-Ahmari AM, Abd Elgawad AEE. Development of PLA/recycled-desized carbon fiber composites for 3D printing: Thermal, mechanical, and morphological analyses. *J Mater Res Technol*. 2024;29:2768-80.

25. Raghunathan V, Ayyappan V, Rangappa SM, Siengchin S. Development of fiber-reinforced polylactic acid filaments using untreated/silane-treated trichosanthes cucumerina fibers for additive manufacturing. *J Elastomers Plast*. 2024; [Epub ahead of print].

26. Ayyappan V, Rangappa SM, Tingsuthiwat J, Fiore V, Siengchin S. Investigation of thermo-mechanical and viscoelastic properties of 3D-printed *Morinda citrifolia* particle reinforced poly(lactic acid) composites. *Polym Compos*. 2024; [Epub ahead of print].

27. Yilmaz S, Gul O, Eyri B, Gamze Karsli Yilmaz N, Yilmaz T. Comprehensive characterization of 3D-printed bamboo/poly(lactic acid) bio composites. *Polym Eng Sci*. 2023;63(9):2958-72.

28. Colon AR, Kazmer DO, Peterson AM, Seppala JE. Characterization of die-swell in thermoplastic material extrusion. *Addit Manuf*. 2023;73:103700.

29. Burrow T. 8 - Flame resistant manmade cellulosic fibres. In: Kilinc FS, editor. *Handbook of Fire Resistant Textiles*. Woodhead Publishing; 2013. p. 221-44.

30. Zheng W, Zhang S, Deng J. Analysis of the adsorption mechanism of phosphoric acid-modified bamboo charcoal for chlorogenic acid based on density functional theory. *Chem Biol Technol Agric*. 2024;11(1):34.

31. Yamamoto Y, Ichiura H, Ohtani Y. Improvement of wet paper strength using a phosphoric acid-urea solution. *Cellulose*. 2019;26(8):5105-16.

32. Su Y, Shi F. Applications of Chiral Phosphoric Acid to Asymmetric Reactions. *Chin J Org Chem*. 2010;30(4):486-98.

33. Gao F, Li X, Zhang X, Liu W, Liu C. Enhancement on both phosphoric acid retention and proton conduction of polybenzimidazole membranes by plasma treatment. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2020;603:125199.

34. Spirio A, Arrigo R, Frache A, Tuccinardi L, Tuffi R. Plastic waste recycling in additive manufacturing: Recovery of polypropylene from WEEE for the production of 3D printing filaments. *J Environ Chem Eng*. 2024;12(3):112474.

35. Nguyen TT, Langenfeld JG, Reinhart BC, Lyden EI, Campos AS, Wadman MC, et al. An evaluation of the usability and durability of 3D printed versus standard suture materials. *Wound Repair Regen*. 2024;32(3):229-33.

36. El Shakhs A, Elessawy NA, El-Saka MF, Hassan GE, Ali MAM. Developing Eco-Friendly 3D-Printing Composite Filament: Utilizing Palm Midrib to Reinforce High-Density Polyethylene Matrix in Design Applications. *Polymers (Basel)*. 2024;16(8):1072.

37. Begum SA, Krishnan PSG, Kanny K. Properties of poly (lactic Acid)/ hydroxyapatite biocomposites for 3D printing feedstock material. *J Thermoplast Compos Mater*. 2024;37(2):644-68.

38. Li H, Ma XX, Gu ZC, Wang X, Li JZ, Jiang J, et al. Pyrolysis and Combustion Characteristics of Boric Acid and Borax Treated Decorative Bamboo Filaments. *BioResources*. 2020;15(4):8146-60.

39. Lewis DM, Hawkes JA, Hawkes L, Mama J. A new approach to flame-retardant cellulosic fabrics in an environmentally safe manner. *Color Technol*. 2020;136(6):512-25.

40. Grdadolnik J, Maréchal Y. Urea and urea-water solutions-an infrared study. J Mol Struct. 2002;615(1-3):177-89.
41. Wu Z, Deng X, Li L, Yu L, Chen J, Zhang B, et al. INVESTIGATION THE FIRE HAZARD OF PLYWOODS USING A CONE CALORIMETER. Wood Res. 2021;66(6):933-42.
42. Tanpichai S, Phoothong F, Boonmahitthisud A. Superabsorbent cellulose-based hydrogels cross-liked with borax. Sci Rep. 2022;12(1):8926.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Curación de datos: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Análisis formal: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Investigación: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Metodología: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Administración del proyecto: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Recursos: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Software: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Supervisión: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Validación: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Visualización: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Redacción - borrador original: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.

Redacción - revisión y edición: Willam Ricardo Esparza Encalada, Wilson Adrian Herrera Villarreal, Betty Alexandra Jaramillo Tituaña, Pamela Estefanía Naranjo Chávez.