

Artículo original

**Efecto del medio y condiciones de cultivo
en el rendimiento y calidad de celulosa
para la obtención de cuero biológico**

**Effect of Environment and Cultivation Conditions on
Yield and Quality of Cellulose for the Production of
Biological Leather**

PERCY FERMÍN VELÁSQUEZ CCOSI¹

 <https://orcid.org/0000-0001-7006-7583>

GILMAR PEÑA ROJAS²

 <https://orcid.org/0000-0002-1888-4989>

Recibido: 20/06/2024

Aceptado: 13/08/2024

Publicado: 10/09/2024

¹Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

²Biología, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

E-mail: ¹percy.velasquez@unsch.edu.pe, ²gilmar.pena@unsch.edu.pe



Esta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0



Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

La industria del cuero enfrenta desafíos por prácticas contaminantes, ya que el curtido tradicional utiliza químicos tóxicos y genera residuos peligrosos. El cuero biológico basado en celulosa bacteriana (CB) surge como solución prometedora para mitigar estos impactos. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del medio y condiciones de cultivo en el rendimiento y calidad de CB para obtener cuero biológico, empleando un consorcio bacteriano de té de kombucha en la fermentación. Se realizaron dos ensayos utilizando el Diseño Óptimo de Experimento. Se evaluó el rendimiento de CB en 10 tratamientos con tres fuentes de carbono: sacarosa (SA), mucílago de cacao (MC) y suero de leche en polvo (SL). También se analizaron la resistencia a la tracción (RT) y el porcentaje de elongación (PE) en 7 tratamientos con tres agentes curtientes: sulfato de cromo (SC), tensotan GL-50 (T-GL) y polvo de tara (PT). Los resultados mostraron que la combinación del tratamiento T1 con 15 % SA, 5 % MC y 0 % SL incrementó significativamente el rendimiento de biomasa ($30,08 \pm 0,15$ g de biomasa/g de sustrato), demostrando una interacción positiva entre estos componentes. Además, el tratamiento T4 (5 % SC, 5 % T-GL, 0 % PT) presentó mejor PE ($17,22 \pm 0,80$ %) y el tratamiento T6 (0 % SC, 5 % T-GL, 5 % PT) mejor RT ($23,12 \pm 0,74$ N/mm²). Este enfoque podría promover la sostenibilidad en la industria del cuero mediante el uso de subproductos agroindustriales y la optimización de procesos de producción más ecoeficientes.

Palabras clave: agentes curtientes; celulosa bacteriana; fuentes de carbono; optimización.

Abstract

The leather industry faces challenges due to polluting practices, as traditional tanning uses toxic chemicals and generates hazardous waste. Bacterial cellulose (BC) based biological leather emerges as a promising solution to mitigate these impacts. This study aimed to evaluate the effects of the medium and cultivation conditions on the yield and quality of BC to obtain biological leather, using a bacterial consortium from kombucha tea during the fermentation process. Two trials were conducted using the optimal experimental design. BC yield was evaluated in 10 treatments with three carbon sources: sucrose (SA), cocoa mucilage (CM), and powdered milk whey (PW). Additionally, the tensile strength (TS) and elongation percentage (EP) were analyzed in 7 treatments with three tanning agents: chromium sulfate (CS), tensotan GL-50 (T-GL), and tara powder (TP). The results showed that the combination of treatment T1 with 15 % SA, 5 % CM, and 0 % PW significantly increased biomass yield (30.08 ± 0.15 g of biomass/g of substrate), demonstrating a positive interaction among these components. Furthermore, treatment T4 (5 % CS, 5 % T-GL, 0 % TP) exhibited better EP (17.22 ± 0.80 %), and treatment T6 (0 % CS, 5 % T-GL, 5 % TP) showed better TS (23.12 ± 0.74 N/mm²). This approach could promote sustainability in the leather industry by using agro-industrial by-products and optimizing more eco-efficient production processes.

Keywords: tanning agents; bacterial cellulose; carbon sources; optimization.



1. Introducción

Durante siglos, la industria del cuero ha sido fundamental en la fabricación de productos duraderos y de alta calidad, utilizados en una amplia gama de aplicaciones que van desde la moda hasta la tapicería y el equipamiento industrial. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos cada vez mayores debido a sus prácticas de producción, que son intensivas en recursos y altamente contaminantes (Christis et al., 2019; United Nations Industrial Development Organization, 2010). El proceso de curtido de pieles, esencial para transformar la piel animal en cuero, implica el uso de una variedad de productos químicos tóxicos como cromo, sulfatos y otros agentes curtientes. Estos productos no solo representan un riesgo significativo para la salud de los trabajadores de la industria del cuero, sino que también generan grandes cantidades de desechos tóxicos que pueden contaminar el suelo y las fuentes de agua circundantes (Dixit et al., 2015; Maina et al., 2019). A pesar de que la industria del cuero utiliza subproductos de la industria de la carne como materia prima, lo que podría considerarse una forma de reciclaje de desechos, la gestión de los residuos biológicos y químicos sigue siendo un reto importante (Yorgancioglu et al., 2020). De acuerdo a Amdouni et al. (2021), de una tonelada de pieles saladas en húmedo, solo aproximadamente 200 kg se convierten en cuero acabado, lo que significa que una cantidad considerable se desecha durante el proceso. Esta realidad subraya la necesidad urgente de buscar alternativas más sostenibles y ecológicas en la producción de materiales similares al cuero.

En respuesta a estos desafíos, el desarrollo de cuero biológico a partir de celulosa bacteriana (CB) emerge como una solución prometedora. Ayyappan et al. (2022) observaron que la adición de nanomateriales mejoró las características fisicoquímicas. Mientras que, García y Prieto (2019) destacaron como sustituto viable del cuero animal. Martínez Leal et al. (2018) enfatizaron sus ventajas respecto a su bajo costo, biodegradabilidad y estructura similar a la celulosa vegetal. Además, Uzca et al. (2021) demostraron la viabilidad de obtener biopolímeros utilizando residuos agroindustriales, contribuyendo así a una economía más circular y sostenible en la industria textil y de materiales. La CB, es principalmente producida a través de una colonia simbiótica de bacterias y levaduras (SCOPY, por sus siglas en inglés), durante el proceso de fermentación del té de Kombucha. Donde predominan el género bacteriano *Gluconacetobacter xylinus*, que es considerada la más eficiente. En cuanto a la población de levaduras suele ser una composición más variada; *Zygosaccharomyces sp.*, *Candida*, *Torulasporea*, *Saccharomyces sp.*, *Pichia sp.*, entre otros microorganismos (Coton et al., 2017).

En sí, la kombucha es una bebida fermentada elaborada a partir de té negro endulzado, que desarrolla un sabor inicialmente amargo similar al de la sidra de manzana y luego evoluciona hacia un ligero sabor a vinagre durante su fermentación de 8 a 10 días. Durante este proceso, una película gelatinosa de celulosa se forma en la superficie del líquido y aumenta las actividades biológicas (Li et al., 2019). Esta celulosa se caracteriza por su alta pureza, excelente biocompatibilidad y capacidad para formar estructuras tridimensionales densas, lo que la hace ideal para aplicaciones en materiales avanzados como el cuero biológico (Saleh et al., 2022). Además, presenta propiedades mecánicas superiores y una estructura nano fibrilar única. Este material no solo evita el uso de pieles animales y productos químicos tóxicos asociados con el curtido tradicional, sino que también permite una producción más controlada y sostenible (Teklay et al., 2017).

Por lo tanto, el objetivo del estudio es evaluar el efecto del medio y condiciones de cultivo en el rendimiento y calidad de celulosa para la obtención de cuero biológico.

2. Metodología

2.1. Adecuación de la materia prima

El estudio integró principios de economía circular, al recuperar subproductos agroindustriales de las cadenas productivas lácteas y de confitería. Identificados como suero de leche y mucílago de cacao. Quille et al. (2021) indica que en el lactosuero permanece casi el 50 % de las proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales de la leche, por lo que su uso es importante.

Para obtener suero de leche en polvo, se recibió la materia prima con un pH entre 4,8 y 6,8 y un contenido de azúcar de 6 a 8° Brix. Se pasteurizó a 70 °C durante 20 segundos para eliminar bacterias ácido-lácticas. Luego, se encapsuló con maltodextrina al 5 % p/p a 35 °C, se atomizó a 2 bar y 150 °C por 20 min, y se tamizó en malla #100 antes de envasarlo en frascos de vidrio de 3 kg. Para su uso, se reconstituyeron 11,5 g en 100 ml de agua y se aplicó hidrólisis enzimática a 40 °C con Lactozyn a 4 ml/L y pH 6,5 para mejorar la asimilación de lactosa por microorganismos. Este procedimiento se siguió de acuerdo a los autores Dantas et al. (2022), Habtegebriel et al. (2021), Juárez (2011), Loachamin & Narváez (2021) y Salimi et al. (2018)

En cuanto a la obtención del mucílago de cacao, se recolectaron mazorcas de la variedad VRAE 99 de la Cooperativa Agraria Cafetalera Valle Río Apurímac en Ayna La Mar (Ayacucho, Perú), libres de patógenos visibles como monilla o *Phytophthora*. Tras la selección, lavado y desinfección con una solución de 5 mL de cloro en 10 L de agua durante 5 min, posteriormente se desmucilaginaron las mazorcas para separar la mucosidad y se lixivió el líquido resultante, filtrándolo dos veces a 0,5 mm y 1 µm de porosidad y 15 plg Hg de presión de vacío para eliminar impurezas y clarificarlo. Seguidamente, se pasteurizó a 70°C durante 15 segundos para detener la actividad enzimática y reducir la presencia de agentes patógenos, preparándolo para su uso en el consorcio microbiano de Kombucha (Uzca et al., 2021).

2.2. Cultivos generadores

Con el suero de leche en polvo, mucílago de cacao tratado y sacarosa disponibles, se formularon diez medios de cultivo estáticos siguiendo el diseño simplex centroide con puntos axiales aumentados. Los componentes principales del medio de cultivo representaron el 20 % de la fórmula total, variando en proporciones de sacarosa (SA 10 % - 15 %), mucílago de cacao (MC 5 % - 10 %) y suero de leche en polvo (SL 0 % - 5 %). El agua destilada constituyó el 75 %, mientras que el té negro (5 %), rico en fuentes de nitrógeno asimilables para el complejo microbiano, se mantuvo constante.

Para la preparación de cultivos generadores de celulosa bacteriana, se pesaron los componentes SA, MC y SL para un litro de cultivo y se mezclaron con agua destilada a 86 °C, té negro (3 %) y extracto de levadura (2 %). La mezcla fue temperada a 20°C para uniformizar y determinar los °Brix y pH. Luego, el cultivo fue inoculado con SCOBY y líquido activador de Kombucha. La fermentación estática se realizó en depósitos de acero inoxidable durante 7 a 8 días a temperatura ambiente, formándose una capa de membranas (Scoby) de 15 a 20 mm en 28 días. Tras la fermentación, se eliminaron las nuevas membranas, registraron los °Brix y pH, y lavaron las membranas con agua destilada para eliminar sólidos adheridos. Luego, se



purificaron con NaOH 1N a 60 °C por 10 minutos para eliminar impurezas. Finalmente, las membranas se pre secaron a 65 °C por 40 min para retirar el exceso de agua y se secaron en un túnel con aire forzado a 85°C y 3 m/s hasta alcanzar peso constante.

2.3. Producción de cuero biológico

Se implementaron tratamientos basados en tres técnicas de curtido, utilizando sulfato de cromo (SC), tensotan GL-50 (T-GL) y polvo de tara (PT), siguiendo los lineamientos de los estudios de Ariram & Madhan (2020), Campano et al. (2016) y Rosu et al. (2018). Los componentes de la mezcla (curtientes) representaron el 10 % del total, variando en porcentajes desde 0 % hasta 10 % para SC, T-GL y PT, lo cual permitió investigar el efecto de mezclas puras, binarias y ternarias en 7 tratamientos en relación con la resistencia a la tracción (RT) en N/mm² y el porcentaje de elongación (%).

Luego, el proceso de obtención de cuero biológico inició con el lavado y neutralización para eliminar azúcares residuales y ajustar el pH a 7 con formiato de sodio (1,5 %), esencial para preparar la celulosa bacteriana antes del curtido con sulfato de cromo (SC), tensotan GL-50 (T-GL) y polvo de tara (PT). Tras el oreado para equilibrar la turgencia celular, se procedió al curtido con un baño de agua potable al 100 % durante 24 horas, aplicando un efecto mecánico intermitente a 5 rpm a temperatura ambiente, teniendo como objetivo estabilizar y conferir propiedades como elasticidad y resistencia al cuero. Posteriormente, se neutralizó con bicarbonato de sodio a 1,5 % p/p para evitar la precipitación de curtientes, seguido de un lavado final y engrase con Tensogras CXM a 5 % p/p para mantener la flexibilidad del material. El secado a 60 °C durante 6 horas concluyó el proceso, reduciendo la humedad y promoviendo la formación de enlaces entre fibras celulósicas.

2.4. Análisis y evaluación de las muestras

La producción de celulosa bacteriana fue evaluada según el modelo cinético propuesto por Marx-Figini y Pion para cultivos estáticos (Jaramillo et al., 2020). Las películas de celulosa fueron retiradas del reactor en diferentes intervalos de tiempo, tratadas con NaOH 0,1 N a 30 °C para disolver las células bacterianas, y luego lavadas dos veces con agua desionizada. Posteriormente, fueron secadas a 60 °C hasta alcanzar peso constante. El rendimiento del producto fue determinado como la relación entre el peso de celulosa producida a los 28 días y los sustratos consumidos.

Se empleó el método descrito por Mendoza et al. (2020) y corresponde a la norma modificada de Kurschner y Hoffer de TAPPI T 222, para determinar el contenido de celulosa en una muestra de fibra molida y tamizada en tamiz N° 45 sin extraíbles. Se pesó 1 g y se determinó la humedad. La muestra se colocó en un balón de 100 ml con refrigerante a reflujo, y se le añadió una mezcla de 10 ml de ácido nítrico y 10 ml de etanol. Se llevó a ebullición suave en baño María durante una hora. Luego, se decantó el líquido sobre un crisol filtrante N° 2, agregando otros 50 ml de la mezcla nitro-alcohólica, y se hirvió otra hora. Este proceso se repitió una tercera vez y se filtró al vacío. El residuo se lavó con agua caliente desionizada y se secó en estufa a 103 °C ± 2 °C hasta peso constante. El resultado se calculó como porcentaje promedio de celulosa.

Por otra parte, los ensayos físicos y mecánicos del cuero biológico siguieron la norma internacional NTP-ISO 3376:2007 para determinar la resistencia a la tracción y el porcentaje de

alargamiento. Para la resistencia a la tracción, las probetas se colocaron en un dinamómetro con las mordazas separadas $50 \text{ mm} \pm 1$ y se registró la máxima fuerza de rotura, F , utilizando la ecuación 1. Para el porcentaje de alargamiento a la rotura, se midió la longitud inicial de la probeta, L_0 con una precisión de 0.5 mm, y la distancia entre las mordazas en el momento de la rotura, L_2 , utilizando la ecuación 2.

$$T_n = \frac{F}{w \times t} \quad (1)$$

Donde F es la fuerza máxima registrada en newtons, w es la anchura media de la probeta en milímetros, y t es el espesor medio de la probeta en milímetros.

$$E_b = \frac{L_2 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

Donde L_2 es la separación entre las mordazas en la rotura y L_0 es la separación inicial entre las mordazas.

2.5. Diseño de la investigación

Se realizaron dos experimentos utilizando el Diseño Óptimo de Experimento de García-Camacha (2017). El primero estuvo relacionado con las fuentes de carbono como SA, MC y SL. Mientras que el segundo ensayó los tres diferentes agentes curtientes SC, T-GL y PT. Así mismo, se utilizó un análisis de regresión múltiple con Minitab versión 18 para evaluar cómo los agentes curtientes afectan la resistencia a la tracción (RT). Se empleó análisis de varianza y se exploraron modelos lineales, cuadráticos y cúbicos para determinar el más significativo ($p < 0,05$, $R^2 > 0,85$). Se construyó una superficie de respuesta para optimizar los agentes curtientes y la RT.

3. Resultados y discusión

3.1. Rendimiento de biomasa

La figura 2 muestra el rendimiento de biomasa (RB) de los 10 tratamientos con diferentes proporciones de sacarosa (SA), mucílago de cacao (MC) y suero de leche (SL) varió entre 13,37 y 30,08 g de biomasa/g sustrato. El tratamiento T1, con 150 g de SA, 50 g de MC y 0 g de SL, alcanzó el mayor RB de $30,08 \pm 0,15 \text{ g/L}$, seguido por T8 (133 g de SA, 58,3 g de MC y 8,3 g de SL) y T7 (116 g de SA, 66 g de MC y 16,6 g de SL) logrando valores RB de $24,09 \pm 0,18$ y $21,19 \pm 0,38 \text{ g/L}$ respectivamente. Sin embargo, en el tratamiento que se obtuvo la menor cantidad fue el T6, que estuvo compuesto por las proporciones de 100 g de SA, 75 g de MC y 25 g de SL, consiguiendo $13,37 \pm 0,74 \text{ g/L}$.

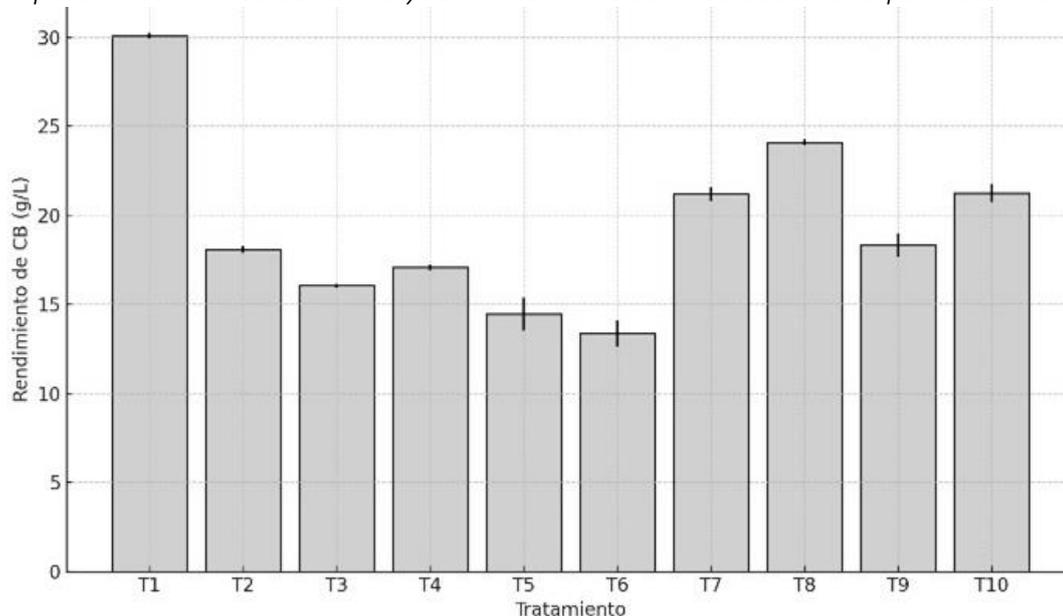
En general, los niveles intermedios de SA y MC, junto con niveles bajos de SL, produjeron un mayor RB, lo que sugiere una interacción positiva entre SA y MC, mientras que el SL por sí solo generó un bajo RB. La adición de nuevos componentes a los medios de cultivo puede mejorar el RB, según Uzca et al. (2021). Estudios de Guinea (2016) y Brown et al. (2018) demostraron que residuos agroindustriales como plátano, piña, mucílago de cacao y lactosa aumentan el RB de celulosa bacteriana. Por otro lado, la comparación entre diferentes fuentes de celulosa mostró que el tratamiento T1 exhibe una pureza notable en relación con las otras fuentes. Según Chávez- Pacheco et al. (2004), el mecanismo de síntesis de celulosa bacteriana



confiere una pureza superior en comparación con las fuentes vegetales, ofreciendo características como cristalinidad, resistencia a la presión, elasticidad y durabilidad.

Figura 1

Proporción de medios de cultivo y rendimiento de celulosa bacteriana por tratamiento



Nota. Las proporciones de las fuentes de carbono fueron: T1 (15 SA – 5 MC – 0 SL %), T2 (10 SA – 10 MC – 0 SL %), T3 (10 SA – 5 MC – 5 SL %), T4 (12,5 SA – 7,5 MC – 0 SL %), T5 (12,5 SA – 5 MC – 2,5 SL %), T6 (10 SA – 7,5 MC – 2,5 SL %), T7 (11,6 SA – 6,6 MC – 1,66 SL %), T8 (13,3 SA – 5,83 MC – 0,83 SL %), T9 (10,8 SA – 8,33 MC – 0,83 SL %) y T10 (10,83 SA – 5,83 MC – 3,33 SL %).

3.2. Optimización de la composición de los medios de cultivo

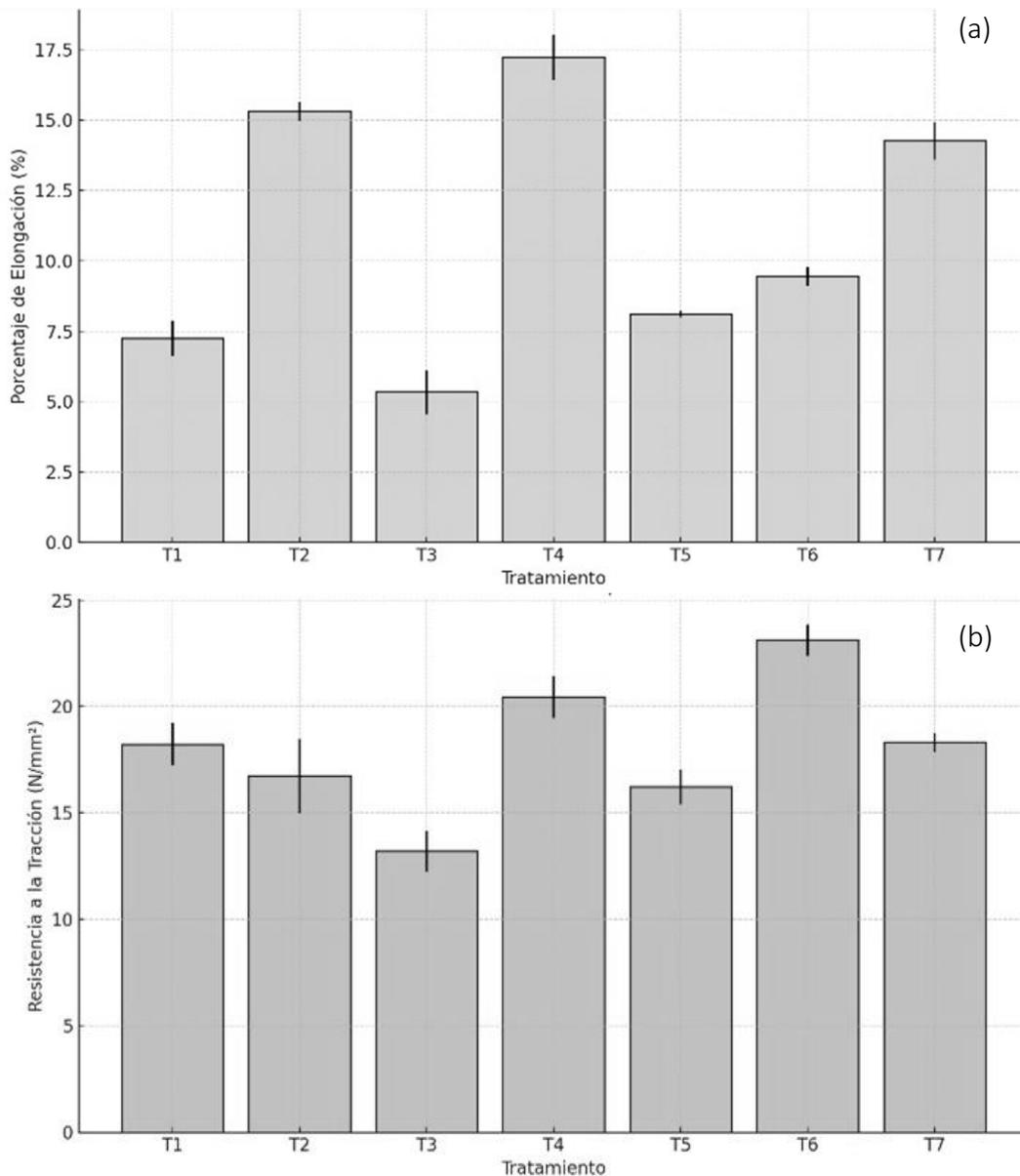
La optimización del rendimiento de biomasa (RB) mediante el diseño simplex centroide (DSC) se evaluó con modelos lineal, cuadrático y cúbico, resultando este último el más adecuado por su valor-p de 0,0377 y coeficiente de determinación R^2 de 93,11 %. El modelo cúbico indicó que la sinergia entre los componentes genera mayores respuestas, mientras que el antagonismo las reduce. Los coeficientes positivos sugieren efectos combinados favorables.

Según Claringbold (1955), en un Diseño Simplex-Centroide, las sinergias y antagonismos son más evidentes al utilizar modelos cuadráticos o cúbicos debido a sus componentes de interacción entre variables. De manera similar en el estudio, se determinó que tanto los componentes individuales como su interacción global tienen un impacto positivo en el RB, a diferencia de las interacciones binarias que no presentan el mismo efecto. En cuanto a la superficie de respuesta, la sacarosa (SA) demostró tener un impacto positivo predominante en el RB, mientras que el mucílago de cacao (MC) y el suero de leche (SL) mostraron menor influencia individual. Estudios previos de Chen & Liu (2000) explicaron que, durante la fermentación de la Kombucha, las levaduras convierten sacarosa en fructosa, glucosa y etanol. Las bacterias ácido acéticas transforman glucosa en ácido glucónico y fructosa en ácido acético. El etanol y ácido acético tienen actividad antimicrobiana, protegiendo la Kombucha y mejorando el rendimiento de biomasa. El medio de cultivo no influye en el rendimiento, y el sustrato de levadura es inerte. Usar solo glucosa aumenta la producción de ácido (ceto) glucónico.

3.3. Análisis físico y mecánico

Las figuras 2a y 2b muestran los valores de los análisis físico mecánicos de tres diferentes agentes curtientes; sulfato de cromo (SC), tensotan GL-50 (T-GL) y polvo de tara (PT) en siete tratamientos. Se observa que los valores variaron entre 13,20 y 23,12 N/mm² para la resistencia a la tracción (RT), y de 5,34 % a 17,22 % para el porcentaje de elongación (PE), indicando que las variaciones en las proporciones de estos componentes permitieron una exploración amplia de estas propiedades. Según la NTP 241.023:2014, se establecen requisitos mínimos de RT ≥ 10 N/mm² y PE ≥ 15 % para empeines de calzado casual.

Figura 2
Optimización de la prueba física (a) y mecánica (b)



Nota. Las proporciones de los agentes curtientes fueron: T1 (10 SC – 0 T-GL – 0 PT %), T2 (0 SC – 10 T-GL – 0 PT %), T3 (0 SC – 0 T-GL – 10 PT %), T4 (5 SC – 5 T-GL – 0 PT %), T5 (5 SC – 0 T-GL – 5 PT %), T6 (0 SC – 5 T-GL – 5 PT %), T7 (3,33 SC – 3,33 T-GL – 3,33 PT %).



Entre los tratamientos, el T6 destacó con la mayor RT (23,12 N/mm²), compuesto por 5 % de T-GL y 5 % de PT, seguido por T4 y T7 con RT de 20,46 y 13,32 N/mm² respectivamente. La combinación de T-GL y PT en niveles intermedios mostró una mayor RT, destacando la interacción positiva entre estos componentes. En cuanto al PE, el T4 mostró el mayor valor (15,32%), compuesto por 5 % de SC y 5 % de T-GL, seguido por T2 y T7 con 14,26 % y 14,26 %, respectivamente. Nuevamente, las mezclas binarias intermedias de SC y T-GL generaron un mayor PE.

Los estudios de Tamilselvi et al. (2019) enfatizan la importancia de considerar tanto la resistencia como la deformación en la evaluación de propiedades del cuero. Wang et al. (2019) destacan la relevancia industrial de la elasticidad en materiales, mientras que Ariram y Madhan (2020) señalan la importancia del estiramiento uniforme del cuero en la comodidad y aplicaciones de productos como prendas y accesorios. Además, Fernandes et al. (2019) explican que el cuero es tratado químicamente para obtener propiedades físicas deseadas, y sugieren explorar agentes curtientes para mejorar resistencia mecánica y flexibilidad. Ayyappan et al. (2022) reportaron mejoras significativas en RT y PE al incorporar nanomateriales a la celulosa bacteriana similar al cuero.

3.4. Optimización del diseño de cuero biológico

Se optó por el modelo cuadrático debido a su cercanía estadística al nivel de confianza ($p = 0,05$) y a su alto coeficiente de determinación. Respecto al porcentaje de elongación los valores del modelo lineal y cuadrático fueron R^2 igual al 68,61 % y 98,23 % simultáneamente. Mientras que para la resistencia a la tracción los valores del modelo lineal y cuadrático fue de R^2 igual al 22,01 % y 91,37 % respectivamente. La formulación del modelo se presenta en las ecuaciones 3 y 4.

$$PE = 7,12 * SC + 15,19 * T - GL + 5,21 * PT + 26,33 * SC * T - GL + 9,89 * SC * PT - 0,93 * T - GL * PT \quad (3)$$

$$RT = 18,43 * SC + 16,95 * T - GL + 13,40 * PT + 7,92 * SC * T - GL - 1,91 * SC * PT + 28,62 * T - GL * PT \quad (4)$$

Donde las abreviaciones de SC, T-GL y PT se refieren a Sulfato de cromo, Tensotan GL-50 y Polvo de tara.

Montgomery (2017) explica que en un Diseño Simplex-Centroide, los coeficientes positivos en los modelos sugieren sinergia entre los ingredientes, lo que genera respuestas mayores cuando se combinan. Por el contrario, coeficientes negativos indican antagonismo, con respuestas menores al mezclar componentes. En esta investigación, los coeficientes del modelo cuadrático tienen efectos positivos en las respuestas, mientras que las interacciones duales (T-GL*PT) y (SC*PT) no lo hacen. La interpretación gráfica de la superficie de respuesta muestra que la combinación de componentes optimiza la resistencia a la tracción (RT) y el porcentaje de elongación (PE) en el cuero biológico, destacando una región de máxima RT y PE en los gráficos de contornos de la figura 4a y 4b.

En otra línea, en la figura 5 presentan los intervalos de predicción de los valores ajustados de los componentes que optimizan la RT y PE, donde se evalúan para verificar si están dentro de los límites aceptables según la norma NTP 241.023:2014.

Figura 3

Gráfica de contorno de las mezclas (proporciones de los componentes)

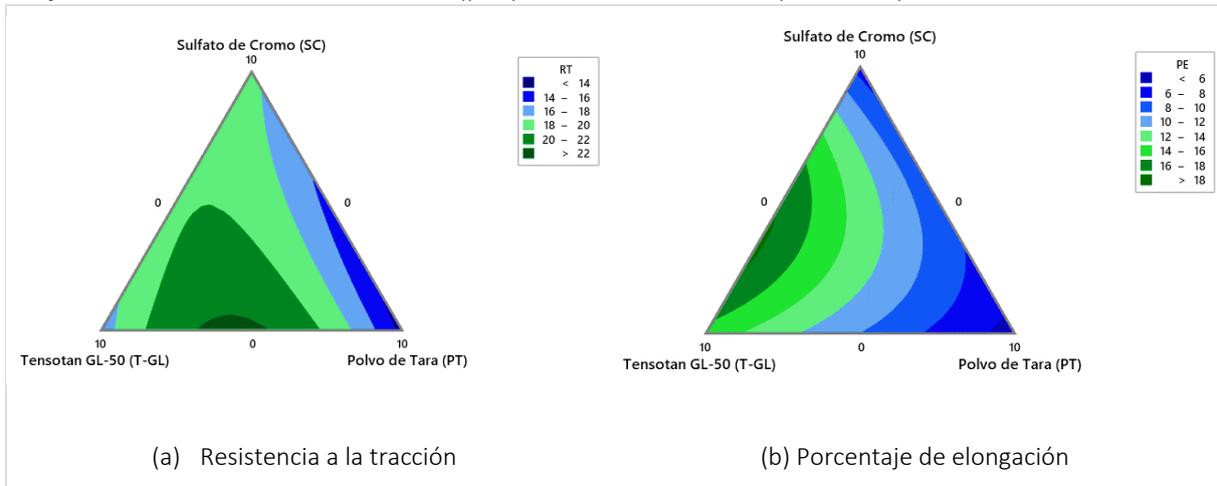
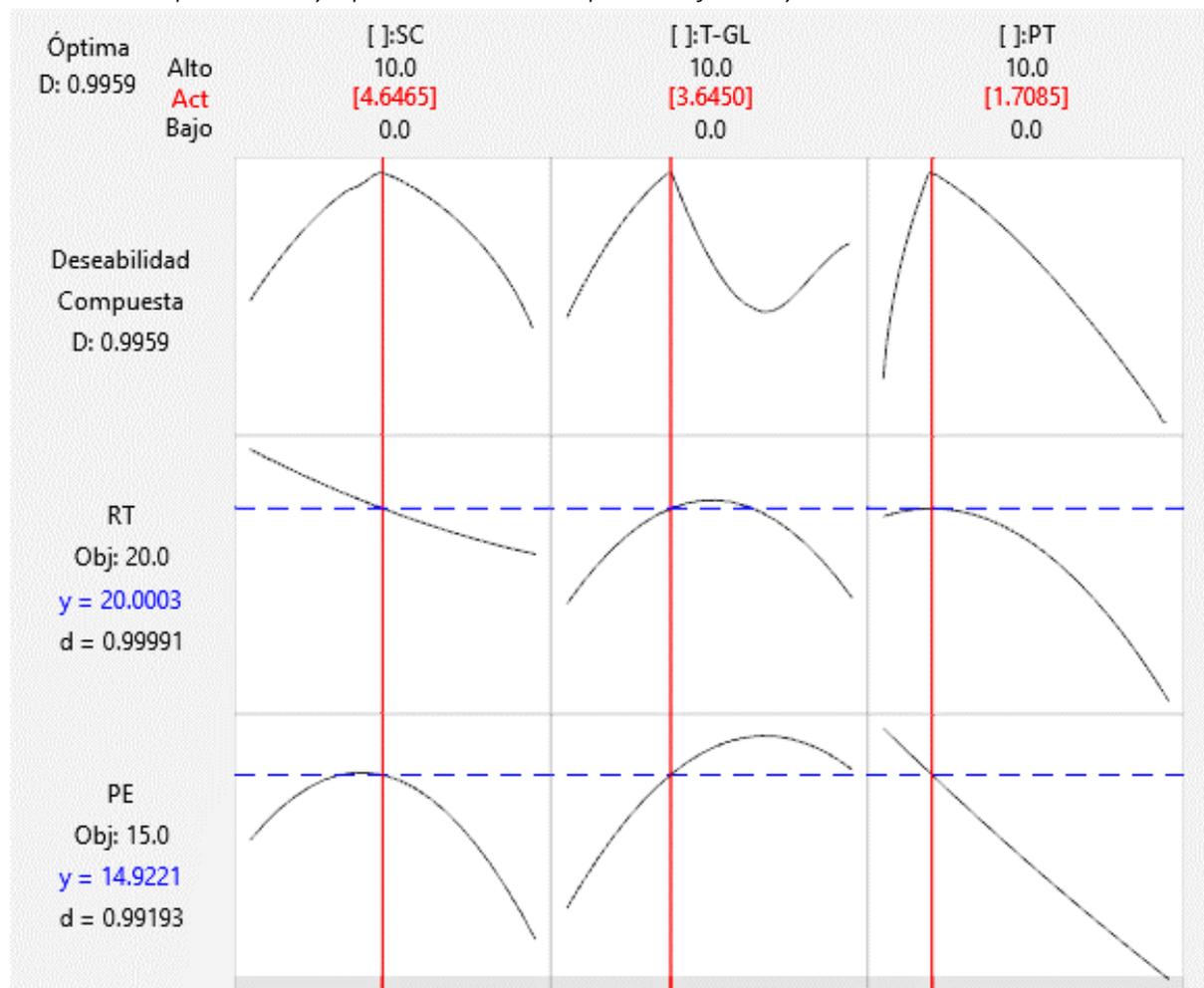


Figura 4

Intervalos de predicción y optimización de las pruebas físicas y mecánicas



Nota. RT y PE se refiere a la Resistencia a la tracción y el Porcentaje de elongación, mientras que SC, T-GL y PT significa Sulfato de cromo, Tensotan GL-50 y polvo de tara.



Los resultados de las pruebas físicas y mecánicas muestran una deseabilidad compuesta de 0,9959. En la gráfica se representan los valores de respuesta para cada nivel de los componentes de la mezcla. Los porcentajes ideales para optimizar la RT y PE del cuero biológico fueron 4,64 % de sulfato de cromo (SC), 3,64 % de Tensotan GL-50 (T-GL), y 1,70 % de polvo de tara (PT). Se proyecta una RT de 20,00 N/mm² con una deseabilidad individual de 0,99991, y una PE del 14,92 % con una deseabilidad individual de 0,99193.

Además, se destaca que el sulfato de cromo muestra que incrementar su porcentaje aumenta el PE hasta cierto punto, mientras que tiene un efecto mínimo en la RT en comparación con PE. Por lo tanto, el ajuste óptimo se sitúa en el punto medio del rango (4,64 %). En estudios realizados por Lucumí et al. (2020), se demostró la influencia del Cr (VI) en la morfología bacteriana mediante bioensayos de reducción de cromo. Ayyappan et al. (2022) investigaron la aplicación de nanomateriales en la celulosa bacteriana para mejorar propiedades mecánicas y físicas mediante interacciones sinérgicas no covalentes. Por otro lado, Tensotan GL-50 (T-GL), un curtiente aldehídico modificado, incrementa todas las respuestas al aumentar su porcentaje, aunque este efecto alcanza un límite después del cual las respuestas disminuyen, mostrando una relación no proporcional ni lineal. Los valores óptimos de configuración para T-GL se encuentran en sus niveles máximos observados en el experimento (3,64 %). En cuanto al polvo de tara, un curtiente vegetal, incrementar su porcentaje aumenta la RT hasta cierto punto, pero disminuye el PE. Los valores adecuados de configuración para el porcentaje de polvo de tara se encuentran en sus niveles mínimos (1,70 %). Según Teklay et al. (2017), el curtido vegetal conserva la fibra del cuero y añade características como suavidad al tacto y elasticidad.

4. Conclusiones

La combinación de sacarosa (SA), mucílago de cacao (MC) y suero de leche (SL) en el medio de cultivo afecta significativamente el rendimiento de biomasa (RB) de celulosa bacteriana. Los niveles intermedios de SA y MC, junto con bajos niveles de SL, resultaron en un mayor RB, sugiriendo una interacción positiva entre SA y MC. El diseño simplex centroide (DSC) utilizado para optimizar las proporciones de estos componentes reveló que el modelo cúbico es el más adecuado para predecir el RB, con un R² de 93,11 %.

Los tratamientos de curtido utilizando sulfato de cromo (SC), tensotan GL-50 (T-GL) y polvo de tara (PT) mostraron variaciones significativas en las propiedades mecánicas del cuero biológico. Las combinaciones binarias de T-GL y PT, así como SC y T-GL, en niveles intermedios demostraron ser las más efectivas, resultando en mejores valores de resistencia a la tracción (RT) y porcentaje de elongación (PE). El modelo cuadrático, con un R² de 91,37 % para RT y 98,23 % para PE, fue el más representativo para predecir estas propiedades.

El uso de celulosa bacteriana obtenida a partir de la fermentación del té de Kombucha es una alternativa viable al cuero animal tradicional. Este material no solo evitaría el uso de pieles animales y productos químicos tóxicos, sino que también podría permitir una producción más controlada y sostenible. Además, se resalta la importancia de integrar principios de economía circular en la producción de cuero biológico a partir de residuos agroindustriales como suero de leche y mucílago de cacao con la finalidad de minimizar el impacto ambiental.

5. Referencias Bibliográficas

- Amdouni, S., Ben Hassen Trabelsi, A., Mabrouk Elasmí, A., Chagtmi, R., Haddad, K., Jamaaoui, F., Khedhira, H., & Chérif, C. (2021). Tannery fleshing wastes conversion into high value-added biofuels and biochars using pyrolysis process. *Fuel (London, England)*, 294(120423), 120423. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120423>
- Ariram, N., & Madhan, B. (2020). Development of bio-acceptable leather using bagasse. *Journal of Cleaner Production*, 250(119441), 119441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119441>
- Ayyappan, V. G., Vhatkar, S. S., Bose, S., Sampath, S., Das, S. K., Samanta, D., & Mandal, A. B. (2022). Incorporations of gold, silver and carbon nanomaterials to kombucha-derived bacterial cellulose: Development of antibacterial leather-like materials. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(1), 100278. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100278>
- Campano, C., Balea, A., Blanco, A., & Negro, C. (2016). Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. *Cellulose (London, England)*, 23(1), 57–91. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0802-0>
- Chávez- Pacheco, J. L., Martínez, Y., Contreras, M., y Escamilla, E. (2004). Celulosa Bacteriana en *Gluconacetobacter xylinum*: Biosíntesis y aplicaciones. *Revista Especializada En Ciencias Químico- Biológicas*, 7(1), 18–25. <https://www.redalyc.org/pdf/432/43270103.pdf>
- Chen, C., & Liu, B. Y. (2000). Changes in major components of tea fungus metabolites during prolonged fermentation. *Journal of Applied Microbiology*, 89(5), 834–839. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.01188.x>
- Claringbold, P. J. (1955). Use of the simplex design in the study of joint action of related hormones. *Biometrics*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.2307/3001794>
- Coton, M., Pawtowski, A., Taminau, B., Burgaud, G., Deniel, F., Coulloume-Labarthe, L., Fall, A., Daube, G., & Coton, E. (2017). Unraveling microbial ecology of industrial-scale Kombucha fermentations by metabarcoding and culture-based methods. *FEMS Microbiology Ecology*, 93(5). <https://doi.org/10.1093/femsec/fix048>
- Dantas, D. S., da Silva Gomes, L., Costa Gonçalves, L. S., Correia, J. O., Silva, G. M. da, Rocha de Queiroga, A. P., dos Santos, K. M. O., Florentino, E. R., & Alonso Buriti, F. C. (2022). Lactose hydrolysis implications on dairy beverages with autochthonous *Limosilactobacillus mucosae* and *Syzygium cumini* pulp. *L-WuT [Food Science and Technology]*, 155(112963), 112963. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112963>
- Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P. D., & Das, M. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.017>
- Fernandes, M., Gama, M., Dourado, F., & Souto, A. P. (2019). Development of novel bacterial cellulose composites for the textile and shoe industry. *Microbial Biotechnology*, 12(4), 650–661. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13387>



- García, C., & Prieto, M. A. (2019). Bacterial cellulose as a potential bioleather substitute for the footwear industry. *Microbial Biotechnology*, 12(4), 582–585. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13306>
- García-Camacha, I. (2017). *Diseño óptimo de experimentos para modelos de mezclas aplicados en la ingeniería y las ciencias experimentales* [Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha]. <https://goo.su/UQDQv>
- Guinea, M. (2016). Diseño de planta piloto para producción de Celulosa Bacteriana [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/98499>
- Habtegebriel, H., Edward, D., Wawire, M., & Seifu, E. (2021). Insolubility and denaturation of whey proteins of skimmed camel milk as affected by spray drying operating parameters. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 517–532. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1883057>
- Jaramillo L, R., Tobio J, W., & Escamilla M, J. (2012). Efecto de la sacarosa en la producción de celulosa por *Gluconacetobacter xylinus* en cultivo estático. *Revista MVZ Cordoba*, 17(2), 3004–3013. <https://doi.org/10.21897/rmvz.235>
- Júares, R. (2011). *Hidrólisis enzimática de la lactosa del suero en polvo* [Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/10606>
- Li, J., Chen, G., Zhang, R., Wu, H., Zeng, W., & Liang, Z. (2019). Production of high crystallinity type-I cellulose from *Komagataeibacter hansenii* JR-02 isolated from *Kombucha* tea. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 66(1), 108–118. <https://doi.org/10.1002/bab.1703>
- Loachamin, B. E., y Narváez, F. M. (2021). *Obtención y caracterización de suero de leche en polvo a partir de lactosuero de la empresa (PROLAD'S) mediante el método de secado por aspersión (spray dryer)* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8177>
- Lucumí, R. S., Mora, A., Lizcano-Valbuena, W. H., y Benítez-Campo, N. (2020). Actividad electroquímica de la Cepa Bacteriana Crlim26 acoplada a la reducción de Cr (VI). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 555–565. <https://doi.org/10.20937/rica.53405>
- Maina, P., Ollengo, M. A., & Nthiga, E. W. (2019). Trends in leather processing: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 9(12), 9626. <https://doi.org/10.29322/ijsrp.9.12.2019.p9626>
- Marsh, A. J., O'Sullivan, O., Hill, C., Ross, R. P., & Cotter, P. D. (2014). Sequence-based analysis of the bacterial and fungal compositions of multiple kombucha (tea fungus) samples. *Food Microbiology*, 38, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.09.003>
- Martínez Leal, J., Valenzuela Suárez, L., Jayabalan, R., Huerta Oros, J., & Escalante-Aburto, A. (2018). A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites. *CyTA - Journal of Food*, 16(1), 390–399. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1410499>

- Mendoza, C. J. W., Velásquez, C. P. F., & Gómez, G. Y. (2020). Caracterización estructural, física y química de la fibra de rastrojo de la cosecha de piña (ananas comosus) golden como alternativa para elaborar papel. *Ingeniería Investiga*, 2(2), 314–323. <https://doi.org/10.47796/ing.v2i2.408>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (8.ª ed.). John Wiley & Sons, Inc. Arizona State University. <https://goo.su/3mIU8>
- NTP ISO 3376 (2007). *Cuero: Ensayos físicos y mecánicos. Determinación de la resistencia a la tracción y del alargamiento*. <https://goo.su/iCwrVz>
- Quille, L., Luque, O. M., & Aruhuanca, F. P. (2021). Potencialidades del lactosuero generado por la industria quesera y su valorización. *Innovación tecnológica y valoración económica*, 1(2), 16–23. <https://doi.org/10.51392/rcidas.v1i2.10>
- Rosu, L., Varganici, C.-D., Crudu, A.-M., Rosu, D., & Bele, A. (2018). Ecofriendly wet–white leather vs. conventional tanned wet–blue leather. A photochemical approach. *Journal of Cleaner Production*, 177, 708–720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.237>
- Saleh, A. K., El-Gendi, H., Soliman, N. A., El-Zawawy, W. K., & Abdel-Fattah, Y. R. (2022). Bioprocess development for bacterial cellulose biosynthesis by novel *Lactiplantibacillus plantarum* isolate along with characterization and antimicrobial assessment of fabricated membrane. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06117-7>
- Salimi, A., Maghsoudlou, Y., & Jafari, S. M. (2018). Effect of emulsion stability and spray drying conditions on physicochemical characteristics of encapsulated powders. *Latin American applied research*, 48(2), 95–100. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2018.265>
- Tamilselvi, A., Jayakumar, G. C., Sri Charan, K., Sahu, B., Deepa, P. R., Kanth, S. V., & Kanagaraj, J. (2019). Extraction of cellulose from renewable resources and its application in leather finishing. *Journal of Cleaner Production*, 230, 694–699. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.401>
- Teklay, A., Gebeyehu, G., Getachew, T., Yaynshet, T., & Sastry, T. P. (2017). Conversion of finished leather waste incorporated with plant fibers into value added consumer products – An effort to minimize solid waste in Ethiopia. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 68, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.024>
- United Nations Industrial Development Organization (2010). *Future Trends in the World Leather and Leather Products Industry and Trade*. <https://goo.su/cpRP4Wz>
- Uzca, C. K., Aguilar, S. M., y Espín, D. L. (2021). Producción y caracterización de un biopolímero obtenido a partir de residuos agroindustriales del cacao (CCN-51). *Ingeniería Química y Desarrollo*, 3(1), 17-29. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9499484>
- Wang, X., Chen, K., Li, W., Hao, D., & Guo, P. (2019). A paper sizing agent based on leather collagen hydrolysates modified by glycol diglycidyl ether and its compound performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 1205–1212. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.047>



Yorgancioglu, A., Başaran, B., & Sancakli, A. (2020). Value addition to leather industry wastes and by-products: Hydrolyzed collagen and collagen peptides. En *Waste in Textile and Leather Sectors*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92699>