

2020

Enero-Diciembre

Journal of Research in Engineering Sciences

Facultad de Ingeniería

E-ISSN: 2590-6429



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

**LA U VERDE
DE COLOMBIA**

Volumen

05

Journal of Research in Engineering Sciences

Facultad de Ingeniería



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

Volumen

05

Enero-Diciembre 2020

Journal of Research in Engineering Sciences

Vol. 5 – Núm. 1

Enero – Diciembre de 2020

Facultad de Ingeniería

© Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA

E-ISSN: 2590-6429

Rector

Dr. Jorge Orlando Gaitán Arciniégas

Vicerrector de Asuntos Estudiantiles y Bienestar Universitario

Dr. Jorge Arturo Torres Escobar

Vicerrectora Administrativa

Dra. María Alejandra Gaitán Castiblanco

Vicerrector de Investigación

Dr. Álvaro Mauricio Zúñiga Morales

Secretario General

Dr. Albino Segura Penagos (e)

Asamblea General

Dr. Héctor Jairo Guarín Avellaneda
(Presidente)

Consejo Superior

Dr. Álvaro Zúñiga García
(Presidente)

Dra. Teresa Arévalo Ramírez
Consejera

Dra. Teresa Escobar de Torres
Consejera

Dr. Emiro Martínez Jiménez
Consejero

Dr. Álvaro Ramírez Rubiano
Consejero

Dr. Héctor Jairo Guarín Avellaneda
Consejero

Dr. Jorge Orlando Gaitán Arciniegas
Consejero y Rector

Fernando Barros Algarra
Representante Principal por los Docentes

Olber Arturo Ayala Duarte
Representante Principal por los Egresados

Juan Sebastián Becerra Gamboa
Representante Principal por los
Estudiantes

DIRECTOR

Ing. Javier D. Hoyos Leyva, Ph.D.
Decano Facultad de Ingeniería
Agroindustrial

EDITOR

Ing. Wilson Daniel Caicedo Chacón
Investigador

COORDINACIÓN EDITORIAL

Facultad de Ingeniería
Fundación Universitaria Agraria de
Colombia



Los textos de los artículos de esta publicación pueden ser reproducidos, citando la fuente. Los juicios emitidos por los autores son de su responsabilidad. Por tanto, no comprometen a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, a la Facultad de Ingeniería ni al Comité Editorial.

Journal of Research in Engineering Sciences by Universidad Agraria de Colombia – Uniagraria is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported License.

La publicación 'Journal of Research in Engineering Sciences' es producto de la Universidad Agraria de Colombia -Uniagraria bajo el ISSN versión digital: 2590-6429, en idioma español. Es un producto editorial protegido por el Copyright © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento Creative Commons (CC).

COMITÉ EDITORIAL

Ing. Wilson Daniel Caicedo Chacón
Ingeniero Agroindustrial.
Maestría en Ingeniería de Alimentos.

Dr. Javier D. Hoyos Leyva
Ingeniero Agroindustrial.
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.
Doctor en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos.

Ing. Gloria S. Barrera Arias
Administradora de Empresas.
Maestría en Ingeniería Industrial.

Ing. Carlos R. Suárez Suárez
Ingeniero Electrónico.
Maestría en Ingeniería Electrónica.

Ing. Luisa Fernanda Rivera Criollo
Ingeniera de Alimentos.
Maestría en Metrología, Calidad e Innovación.

Ing. Jeniffer Lyda Sánchez
Ingeniera Civil.

Ing. Yuly Andrea Rodríguez Quiñonez
Ingeniera Biotecnológica.
Maestría en Ingeniería Ambiental.

Ing. Jaime Roldán Parra
Ingeniero de Alimentos.
Maestría en Gestión de la Calidad y Productividad.

COMITÉ CIENTÍFICO

Ing. Johan Esteban Villamil Galindo
Ingeniero de Alimentos.
Universidad Nacional del Litoral de Argentina.

Ing. Deivis Suárez Rivero
Ingeniero Agrónomo.
Maestría en Biología Vegetal.

Ing. Johana Colina Moncayo
Ingeniera Química.
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.
Doctorado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR

Ing. Ángela María Farías Campomanes
Ing. Mauricio Aníbal Sierra Sarmiento
Ing. Rubén Alberto Lozano Gil
Ing. Andrés Mauricio Díaz
Ing. Diana Catalina Guzmán
Ing. Martha Melizza Ordóñez
Ing. Nelson Enrique Rodríguez Corredor

Corrección de estilo

María Camila Remolina Quiroga

**Concepto gráfico,
composición y diagramación**
Entrelibros SAS.

www.entrelibros.co
Ian Guarnizo - Diseñador

Bogotá D.C. - Colombia
2020

ISSN versión digital
2590-6429

Contenido

Nota editorial	5
Decano Javier D. Hoyos-Leyva Ph.D.	
Daños por frío en banano (<i>Musa sp.</i> grupo AAA, subgrupo Cavendish): respuestas fisicoquímicas integradas y desestabilización de la membrana bajo diferentes temperaturas de almacenamiento	8
Hoyos Leyva J. D., Oviedo Pereira D. G., Villamil Galindo J. E. y Caicedo Chacón W.	
The addition of <i>Jatropha</i> proteins and bentonite modified the mechanical and barrier properties of a soy protein film	33
Sierra-Sarmiento, M. A., Hurtado-Amado, N., Espitia-Vasquez, R. A. y Hoyos-Leyva, J. D	
Radish flour obtained by combined osmotic dehydration and microwave drying: Process optimization and application in cookies	45
Cifuentes-Cruz, L. M. y Villamil-Galindo, J. E.	
Implementación de un sistema de riego automatizado para el cultivo de café en la finca Villa de Lobos, San Francisco, Cundinamarca	52
Álvarez, J. M., Aponte, J. D. y Quintero, L. D.	
Tendencias actuales en la producción de bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales: una oportunidad para la agroindustria en Colombia	61
Tovar-Díaz, L. A., Gómez-Ángel, K. L. y Hoyos-Leyva, J. D.	
Instrucciones para los autores	89

Editorial

Ejercer la ingeniería durante décadas en contextos como el colombiano deja una enseñanza clara: el verdadero valor del conocimiento no reside únicamente en su novedad, sino en su capacidad de adaptarse, transferirse y generar impacto en realidades productivas concretas. Este volumen 2020 del Journal of Research in Engineering Sciences (JRES) se inscribe precisamente en esa lógica, al reunir contribuciones que no solo representan avances técnicos, sino que dialogan directamente con los desafíos estructurales de la ingeniería en Colombia.

Los artículos aquí presentados convergen en la transformación sostenible de recursos y en la modernización de sistemas productivos, particularmente en el ámbito agroindustrial, uno de los pilares históricos y estratégicos del país. El estudio sobre la modificación de películas de proteína de soja mediante la incorporación de proteínas de *Jatropha* y bentonita, por ejemplo, trasciende el desarrollo de nuevos materiales y se alinea con la necesidad nacional de reducir la dependencia de polímeros derivados del petróleo, abriendo la puerta a soluciones basadas en biomasa que pueden producirse localmente y articularse con cadenas de valor existentes. En esta misma línea, la investigación sobre la obtención de harina de rábano mediante tecnologías combinadas de deshidratación y secado ilustra con claridad el potencial de la

Practicing engineering for decades in contexts like Colombia's leaves a clear lesson: the true value of knowledge lies not solely in its novelty but in its capacity to adapt, transfer, and generate impact in concrete productive realities. This 2020 volume of the Journal of Research in Engineering Sciences (JRES) follows precisely that logic, bringing together contributions that not only represent technical advances but also speak directly to the structural challenges of engineering in Colombia.

The articles presented here converge on the sustainable transformation of resources and the modernization of productive systems, especially in the agro-industrial sphere, one of the country's historical and strategic pillars. The study on the modification of soy protein films through the incorporation of *Jatropha* proteins and bentonite, for example, goes beyond the development of new materials and aligns with the national need to reduce dependence on petroleum-derived polymers, opening the door to biomass-based solutions that can be produced locally and integrated into existing value chains. Along the same lines, the investigation on obtaining radish flour through combined dehydration and drying technologies clearly showcases the potential of process engineering for the valorization of agricultural raw materials.

ingeniería de procesos para la valorización de materias primas agrícolas. En un país donde las pérdidas poscosecha siguen siendo significativas, este tipo de desarrollos no solo optimiza operaciones, sino que contribuye a la diversificación productiva y a la generación de nuevos mercados para pequeños y medianos productores.

El trabajo sobre daño por frío en banano adquiere una relevancia particular en el contexto colombiano, donde este cultivo representa una de las principales líneas de exportación agrícola. Comprender los mecanismos fisicoquímicos asociados a la desestabilización de membranas bajo condiciones de almacenamiento no es un ejercicio académico aislado, sino una herramienta para mejorar la calidad, reducir pérdidas y fortalecer la competitividad en mercados internacionales altamente exigentes.

Por su parte, la revisión de las tendencias en la producción de bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales introduce una discusión estratégica para el país. Colombia, con su amplia base agroindustrial y su creciente interés en la bioeconomía, tiene la oportunidad de posicionarse en la transición hacia combustibles sostenibles para la aviación. Este trabajo aporta elementos clave para entender cómo la ingeniería puede articular residuos, tecnología y mercado en esquemas de biorrefinería con impacto económico y ambiental.

La implementación de un sistema de riego automatizado en un cultivo de café en Cundinamarca refleja con precisión el tipo de ingeniería que el país necesita: contextualizada, eficiente y transferible.

In a country where post-harvest losses remain significant, this type of development not only optimizes operations but also contributes to productive diversification and the creation of new markets for small and medium-sized producers.

The work on chilling injury in bananas takes on relevance in the Colombian context, given that this crop represents one of the country's main agricultural export lines. Understanding the physicochemical mechanisms associated with membrane destabilization under storage conditions is not an isolated academic exercise but rather a tool for improving quality, reducing losses, and strengthening competitiveness in highly demanding international markets.

The review of trends in biojet fuel production from agro-industrial subproducts introduces a new strategic discussion for the country. Colombia, with its broad agro-industrial base and its increasing interest in the bioeconomy, has the opportunity to position itself in the transition toward sustainable aviation fuels. This work provides key elements to understand how engineering can articulate waste, technology, and markets within biorefinery schemes with an economic and environmental impact.

The implementation of an automated irrigation system in a coffee crop in Cundinamarca reflects with precision the type of engineering the country needs: contextualized, efficient, and transferable. Automation applied to agriculture not only improves productivity and water resource use but also helps bridge technological gaps in rural areas, thereby strengthening the sustainability of the coffee sector.

La automatización aplicada a la agricultura no solo mejora la productividad y el uso del recurso hídrico, sino que también contribuye a cerrar brechas tecnológicas en zonas rurales, fortaleciendo así la sostenibilidad del sector cafetero.

Los trabajos de este volumen evidencian una ingeniería que no se limita a la generación de conocimiento, sino que se proyecta como un agente activo en la transformación del territorio. En el caso colombiano, donde convergen biodiversidad, vocación agroindustrial y retos de desarrollo, este tipo de aportes resulta particularmente valioso. Más que soluciones aisladas, lo que aquí se presenta es una muestra de cómo la ingeniería puede integrarse de manera coherente a las necesidades del país, contribuyendo a su competitividad, sostenibilidad y capacidad de innovación.

Esa, en última instancia, es la ingeniería que perdura: la que entiende su contexto y responde a él con rigor y sentido práctico, alineada con los pilares misionales de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (UNIAGRARIA): desarrollo regional con enfoque territorial, sustentabilidad ambiental y la cultura del emprendimiento.

The projects in this volume demonstrate that engineering is not only limited to the production of knowledge but rather projects itself as an active agent in the transformation of the territory. In the Colombian case, where biodiversity, agro-industrial vocation, and development challenges converge, these types of contributions are particularly valuable. More than isolated solutions, what is presented here is a demonstration of how engineering can be coherently integrated into the country's needs, contributing to its competitiveness, sustainability, and innovation capacity.

That, ultimately, is the engineering that endures: the one that understands its context and responds to it with rigor and practical sense, aligned with the foundational pillars of the Fundación Universitaria Agraria de Colombia (UNIAGRARIA): regional development with a territorial focus, environmental sustainability, and a culture of entrepreneurship.

Javier D. Hoyos-Leyva, Ph.D.

Decano (E) de la Facultad de Ingeniería
Agroindustrial

Director (E) de programa Maestría en
Ingeniería

Javier D. Hoyos-Leyva, Ph.D.

Acting Dean of the Faculty of Agroindustrial
Engineering

Acting Director of the Master's Program in
Engineering

Daños por frío en banano (*Musa sp.* grupo AAA, subgrupo Cavendish): respuestas fisicoquímicas integradas y desestabilización de la membrana bajo diferentes temperaturas de almacenamiento

Chilling injury in banana (*Musa sp.* AAA group, Cavendish sub-group): Integrated physicochemical responses and membrane destabilization under different storage temperatures on fruits

Hoyos Leyva J. D.^{1*}, Oviedo Pereira D. G.^{1,2}, Villamil Galindo J. E.³ y Caicedo Chacón W.³

¹Grupo de Investigación en Ingeniería Agroindustrial - GINNA, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

²Doctorado en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos, CeProBi, Instituto Politécnico Nacional, México.

³Grupo de Investigación en Ingeniería de Alimentos - INGALS, Facultad de Ingeniería de Alimentos, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / **Fecha de aceptación:** julio de 2020

Resumen

La calidad postcosecha del banano está fuertemente influenciada por la temperatura y el tiempo de almacenamiento, factores que regulan cambios fisiológicos, bioquímicos y estructurales del fruto. En este estudio se evaluó el efecto del almacenamiento a 5, 10 y 20 °C, así como de las condiciones en transferencia a temperatura ambiente, sobre parámetros clave de calidad como color (L^* , a^* , b^*), pérdida de electrolitos, textura (dureza y penetración) y pérdida de peso durante 21 días.

Los resultados mostraron que el almacenamiento a 5 °C induce daño por frío, evidenciado por un incremento en la fuga de electrolitos, el oscurecimiento de la cáscara, la disminución de la luminosidad (L^*), alteraciones en el desarrollo del color amarillo (b^*) y ablandamiento anómalo,

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

asociado a daño celular más que a un proceso de maduración fisiológica. En contraste, los frutos almacenados a 20 °C presentaron una maduración acelerada y coordinada, con mayor pérdida de peso y cambios progresivos en textura.

El almacenamiento a 10 °C permitió mantener un equilibrio entre la reducción de la actividad metabólica y la conservación de la integridad celular. Los tratamientos de transferencia evidenciaron que la exposición previa a bajas temperaturas genera daños irreversibles que se manifiestan al restablecer las condiciones ambientales. En conjunto, los resultados resaltan la importancia de optimizar la temperatura de almacenamiento para preservar la calidad del fruto y reducir pérdidas en la cadena de suministro.

Palabras clave: daño por frío, postcosecha de banano, integridad de membranas, almacenamiento para exportación.

Abstract

The postharvest quality of banana is strongly influenced by storage temperature and time, which together regulate physiological, biochemical, and structural changes in the fruit. This study evaluated the effects of storage at 5, 10, and 20°C, as well as temperature transfer conditions, on key quality parameters including color (L^* , a^* , b^*), electrolyte leakage, texture (firmness and penetration), and weight loss over 21 days.

Results showed that storage at 5°C induced chilling injury, characterized by increased electrolyte leakage, peel browning, reduced luminosity (L^*), impaired yellow color development (b^*), and abnormal softening associated with cellular damage rather than normal ripening. In contrast, fruits stored at 20°C exhibited rapid and coordinated ripening, with increased respiration, greater weight loss, and progressive softening.

Storage at 10°C maintained a better balance, reducing metabolic activity while preserving membrane integrity, color development, and texture. Temperature transfers revealed that prior exposure to low temperatures triggers irreversible physiological damage that becomes evident under ambient conditions. Overall, the findings highlight the importance of optimizing storage temperature to maintain fruit quality and reduce postharvest losses in banana supply chains.

Keywords: Banana postharvest, weight loss, membrane integrity, exportation storage.

Introducción

La calidad postcosecha de frutas climatéricas tropicales está determinada por una interacción compleja entre el metabolismo respiratorio, la integridad de las membranas y la regulación hormonal, particularmente del etileno (Zhang *et al.*, 2017). En este contexto, el banano (*Musa sp.* grupo AAA, subgrupo Cavendish) representa un modelo de alta sensibilidad al almacenamiento en frío (Der Agopian *et al.*, 2011; He *et al.*, 2018), lo cual limita significativamente su manejo logístico para la exportación a mercados como Estados Unidos, Europa y países de Oriente.

Aunque la refrigeración es la estrategia más efectiva para reducir la tasa respiratoria y prolongar la vida útil de frutas y vegetales (Sousa-Gallagher *et al.*, 2016), en especies tropicales induce desórdenes fisiológicos conocidos como daño por frío (*chilling injury*) (Patel *et al.*, 2016). Este fenómeno ocurre a temperaturas superiores al punto de congelación y se manifiesta mediante disrupciones estructurales en membranas celulares, desequilibrio redox y alteraciones en rutas metabólicas clave, incluyendo la degradación de clorofilas, la síntesis de compuestos fenólicos y la actividad enzimática oxidativa.

En banano, temperaturas por debajo de 13 °C desencadenan respuestas fisiológicas irreversibles (Li *et al.*, 2016), incluyendo la pérdida de la compartimentalización celular (Zhang *et al.*, 2009), el incremento de la permeabilidad de la membrana y la acumulación de metabolitos asociados al

estrés anaeróbico (Pott *et al.*, 2020). Estos cambios se traducen en síntomas visibles como el pardeamiento epidérmico, la maduración irregular, la pérdida de firmeza y el desarrollo de sabores indeseables, los cuales frecuentemente se intensifican tras la transferencia a temperaturas ambientales (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2018).

Persiste una brecha en la integración cuantitativa entre indicadores fisicoquímicos (color, textura, pérdida de peso) y biomarcadores fisiológicos como la fuga de electrolitos. Este estudio tiene como objetivo abordar esta brecha mediante una evaluación sistemática del efecto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento sobre la calidad postcosecha del banano, con énfasis en los mecanismos asociados al daño por frío.

Materiales y métodos

Se adquirieron bananos comerciales en un mercado local en Santiago de Querétaro (México), de la variedad Cavendish, en estado de madurez comercial. Los bananos se almacenaron a tres temperaturas: 5, 10 y 20 °C durante tres semanas. Cada siete días se tomaron muestras de cada temperatura de almacenamiento para realizar las evaluaciones correspondientes de calidad. Además, para las condiciones de refrigeración, se transfirieron muestras de las temperaturas de refrigeración (5 y 10 °C) a 20 °C (transferencias), las cuales se evaluaron después de 7 días adicionales a esta temperatura. Se preparó un lote de 96 bananos de la misma variedad, con tamaño y estado de madurez homogéneos.

Tabla 1. Número de unidades utilizadas por cada muestreo de bananos almacenados a diferente temperatura

Semana	Días de almacenamiento	Temperatura (°C)				
		5 °C	10 °C	20 °C	De 5 °C a 20 °C	De 10 °C a 20 °C
1	7	6	6	6	-	-
2	14	6	6	6	6 (1era transferencia)	6 (1era transferencia)
3	21	12	6	3	6 (2da transferencia)	6 (2da transferencia)

Nota. La primera transferencia corresponde a 7 días a la temperatura original más 7 días a 20 °C; la segunda transferencia corresponde a 14 días a la temperatura original más 7 días a 20 °C.

Fuente. Elaboración propia.

En cada periodo de muestreo se evaluaron las siguientes variables:

Porcentaje de pérdida de peso

Se pesó cada fruto al inicio del experimento (peso inicial (Pi)) y después de cada periodo de almacenamiento (peso final (Pf)) y se calculó el porcentaje de pérdida de peso (% Pp) mediante la Ecuación (1):

$$\%Pp = ((Pi - Pf) / Pi) \times 100 \quad (1)$$

Color externo

En una zona media del fruto se midieron los parámetros de color L*a*b* mediante un espectrofotómetro Minolta CR 2000 (Konica Minolta, Inc., Tokio, Japón). El fruto se colocó sobre la boquilla del colorímetro de manera que no hubiera salida de la luz emitida por el instrumento.

Calidad visual externa

Mediante una cámara fotográfica se registraron las características visuales de los bananos.

Las imágenes se tomaron con la misma cámara y desde el mismo ángulo del fruto en todas las mediciones.

Textura interna

Se retiró la cáscara del banano y se expuso el fruto. La textura se midió en tres partes a lo largo de todo el banano utilizando un analizador de textura (Texture Analyzer). Se realizó la prueba de penetración de 5 mm con una velocidad de viaje de la sonda de 1 mm s⁻¹. Los datos se registraron como dureza (N) y deformación de la muestra (mm).

Liberación de electrolitos

Con un sacabocados de 1 cm de diámetro se tomaron muestras de la piel de banano; cada muestra se colocó en tubos Falcon de 50 mL y se añadieron 10 mL de agua destilada. Las muestras se dejaron reposar durante 10 min, agitando suavemente. Al final del tiempo de reposo, se midió la conductividad eléctrica de la solución mediante un electrodo de conductividad y se registró la lectura (Cf).

La pérdida de electrolitos se calculó como el porcentaje de conductividad respecto a la conductividad total Ecuación (2).

$$\%Pelect = (Cf/Ci) \times 100 \quad (2)$$

Donde % Pelect = pérdida de electrolitos; Cf = conductividad final; Ci = conductividad inicial.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se empleó el software JMP®, versión 10.1 (JMP Statistical Discovery LLC, Cary, NC, EE. UU.). Se realizó un análisis de varianza para determinar las diferencias entre medias, con un nivel de significancia estadística del 5 % ($\alpha = 0,05$).

Cuando se encontraron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

Resultados y discusión

Cambios físicos en los bananos por efecto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento

En la Figura 1 se observan los bananos al momento de la recepción de la muestra, con un color verde-amarillo, una forma alargada y ligeramente curvada, con estado de maduración incompleto y textura firme. En la figura 1b se muestra la parte interna del banano, caracterizada por una cáscara y textura firme. Después de una semana de almacenamiento (7 días), se tomaron

Figura 1. Bananos comerciales usados en el experimento en grado de madurez comercial (a) sin presencia de daños internos en la pulpa (b)



a



b

Fuente. Elaboración propia.

muestras de banano para la evaluación visual y la medición de las variables fisicoquímicas.

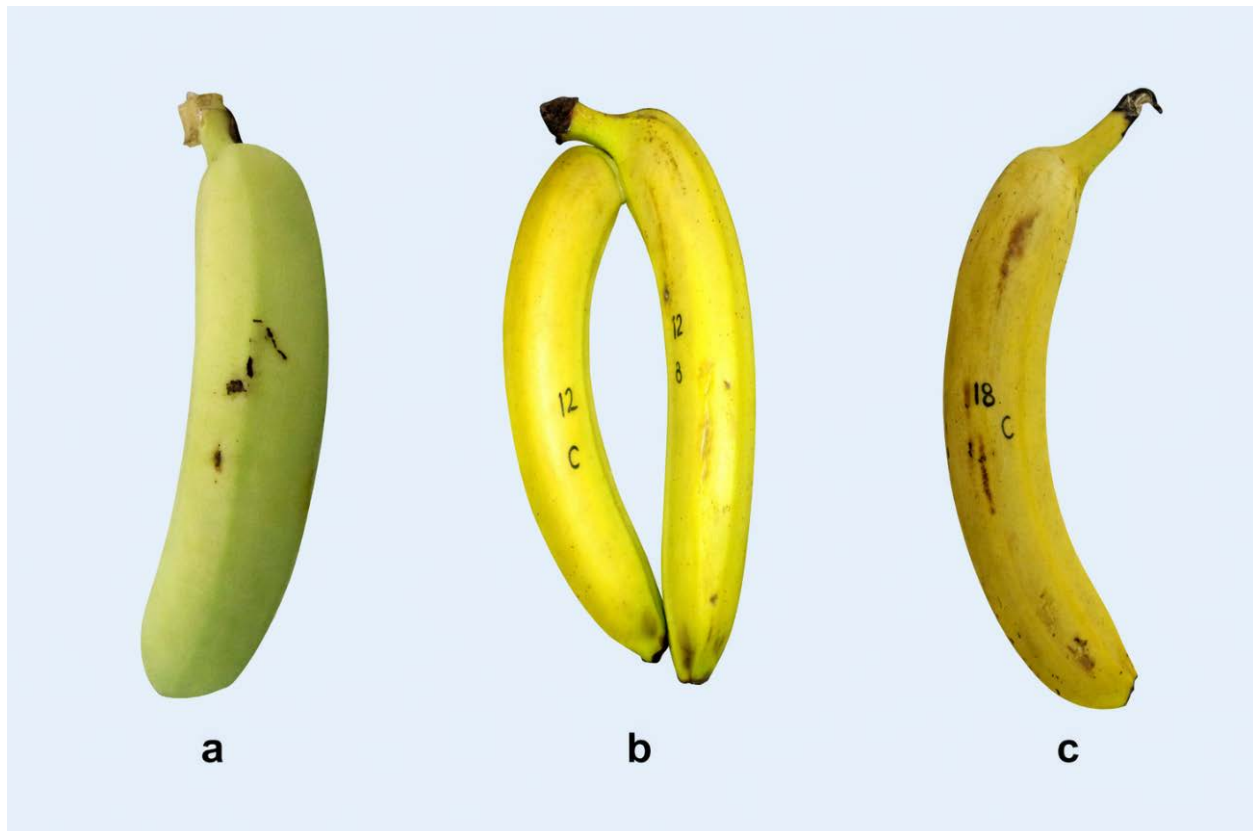
En la Figura 2 se evidencian diferencias claras en el color de la cáscara en función de la temperatura de almacenamiento.

A 5 °C, los frutos conservaron una coloración verde opaca, lo que indica una inhibición del proceso de maduración. Este comportamiento está asociado a la baja actividad metabólica a temperaturas reducidas, que limita la degradación de clorofila, pigmento responsable del color verde del fruto.

En el banano, este proceso es altamente sensible a la temperatura, y su ralentización impide la transición normal hacia estados de madurez más avanzados.

En contraste, los frutos almacenados a 10 °C presentaron una coloración amarillo brillante, acompañada de la aparición de manchas características de estados intermedios de maduración. Esto sugiere que, bajo estas condiciones, la degradación de clorofila y la síntesis de carotenoides ocurren de manera más equilibrada, permitiendo una evolución del color más cercana a la maduración fisiológica normal.

Figura 2. Comparación visual de los frutos de banano almacenados durante 7 días a 5 °C (a), 10 °C (b) y 20 °C (c)



Fuente. Elaboración propia.

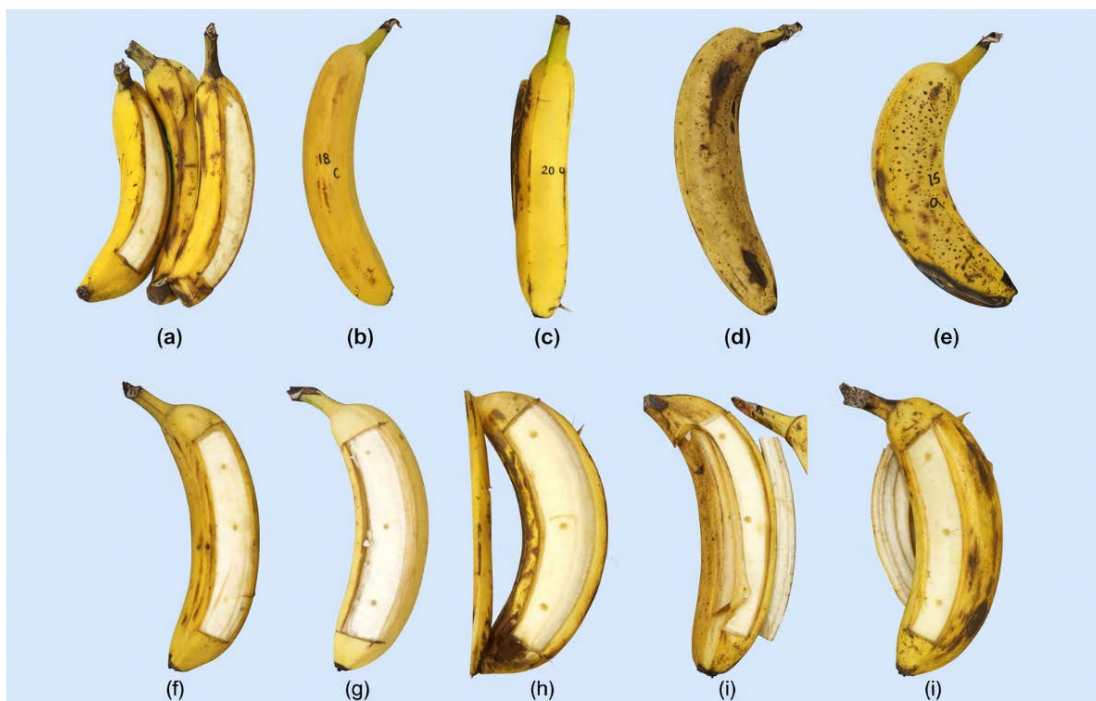
Por su parte, los bananos almacenados a 20 °C mostraron una coloración amarilla más uniforme con presencia de pequeñas manchas oscuras, lo cual es típico de frutos en un estado de madurez más avanzado. Este comportamiento se explica por una mayor actividad respiratoria y una aceleración del metabolismo climatérico, que favorece la degradación de clorofila y la acumulación de pigmentos amarillos, así como la aparición de compuestos fenólicos oxidados que generan las manchas oscuras.

En la Figura 3 (a-e) se presentan los frutos de banano enteros tras 14 días de almacenamiento a diferentes temperaturas. Se observa una coloración amarilla opaca, acompañada de la aparición de manchas en los frutos sometidos a transferencia de

temperatura de refrigeración (5 o 10 °C) a temperatura ambiente (20 °C). El daño más severo se presenta a 5 °C, donde se evidencia un color oscuro y un mayor ablandamiento. En la transferencia de 10 a 20 °C se observan hendiduras más profundas.

En la Figura 3 (f-j) se presenta la comparación de la parte interna de los bananos a diferentes temperaturas, donde se observan transformaciones estructurales y fisiológicas asociadas a la maduración, como cambios en el color de la pulpa, incremento en la translucidez, aparición de manchas internas y modificaciones en la firmeza del tejido. En estados más avanzados, la pulpa presenta mayor oscurecimiento y signos de degradación.

Figura 3. Comparación visual de los frutos de banano almacenados durante 14 días a 5 °C (a, f), 10 °C (b, g), 20 °C (c, h) y las transferencias de 5 °C a 20 °C (d, i) y de 10 °C a 20 °C (e, j)



Fuente. Elaboración propia.

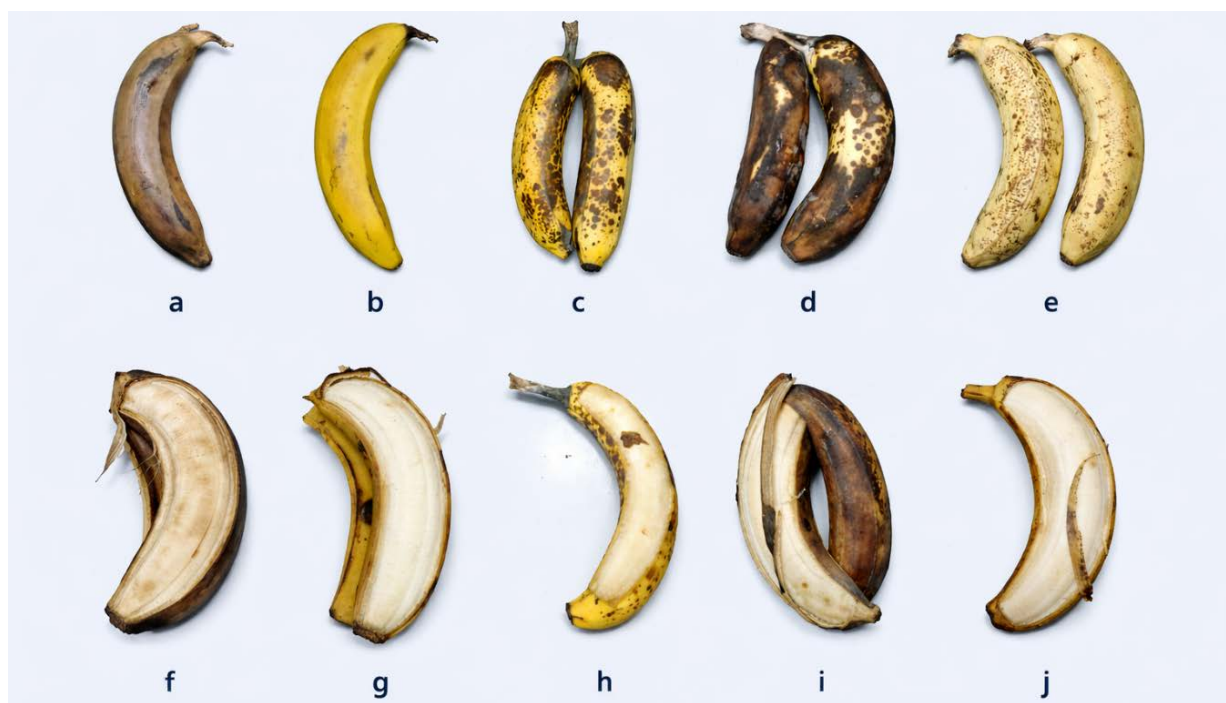
En la Figura 4 (a-e) se presenta la comparación de frutos de banano tras 21 días de almacenamiento bajo diferentes condiciones térmicas. Los resultados evidencian que la temperatura ejerce un efecto determinante sobre la estabilidad estructural y metabólica del fruto. A 5 °C, los bananos exhiben un oscurecimiento epidérmico generalizado, asociado con daño por frío severo, el cual se manifiesta a través de la ruptura de tejidos, la pérdida de agua y el colapso celular (Liu *et al.*, 2020).

Este comportamiento es consistente con la desestabilización de membranas y la subsecuente oxidación de compuestos fenólicos. En este tratamiento se observan desórdenes marcados en la maduración, incluyendo alteraciones en la textura,

el sabor y el aroma, lo cual sugiere una disrupción en la regulación del metabolismo climatérico. En contraste, los frutos almacenados a 20 °C presentan una maduración más homogénea, aunque con evidencia de senescencia avanzada y desarrollo de microorganismos. De manera similar, las condiciones de transferencia (5 a 20 °C y 10 a 20 °C) favorecieron la aparición de crecimiento fúngico, lo cual puede atribuirse a la reactivación metabólica en tejidos previamente debilitados.

Los cambios más severos a nivel estructural se registraron en los frutos almacenados a 5 °C y en la transferencia de 5 a 10 °C, donde el oscurecimiento total y la pérdida de integridad estructural evidencian daño irreversible.

Figura 4. Comparación visual de los frutos de banano almacenados durante 21 días a 5 °C (a, f), 10 °C (b, g), 20 °C (c, h) y las transferencias de 5 °C a 20 °C (d, i) y de 10 °C a 20 °C (e, j)



Fuente. Elaboración propia.

Por su parte, la Figura 4 (f-j) muestra la evaluación del tejido interno, permitiendo establecer una correlación directa entre el daño externo y la degradación interna. Los frutos sometidos a 5 °C presentan hundimientos en la superficie, pulpa blanda y pérdida de firmeza, acompañados de olores desagradables, indicativos de procesos avanzados de deterioro y posible actividad microbiana. Este deterioro estructural está estrechamente relacionado con la pérdida de turgencia celular y la degradación de los componentes de la pared celular.

En contraste, los frutos almacenados a 10 °C y aquellos sometidos a transferencia de 10 a 20 °C muestran una mejor conservación del tejido interno, con menor grado de oscurecimiento y mayor integridad estructural. Este comportamiento confirma que los 10 °C representan un umbral fisiológico más adecuado para el almacenamiento de banano, al minimizar el daño por frío sin comprometer significativamente el proceso de maduración.

Desde una perspectiva bioquímica, los resultados sugieren que la exposición a bajas temperaturas induce un incremento en la actividad de enzimas oxidativas como la polifenol oxidasa, junto con una disminución en el contenido de compuestos fenólicos, lo que favorece el pardeamiento epidérmico observado. Paralelamente, se evidencia una mayor degradación de clorofilas y proteínas, contribuyendo a la pérdida de calidad visual y nutricional del fruto.

En términos fisiológicos, el estrés por frío genera una reducción en la tasa respiratoria inicial, seguida de una desregulación en la producción de etileno, lo cual puede

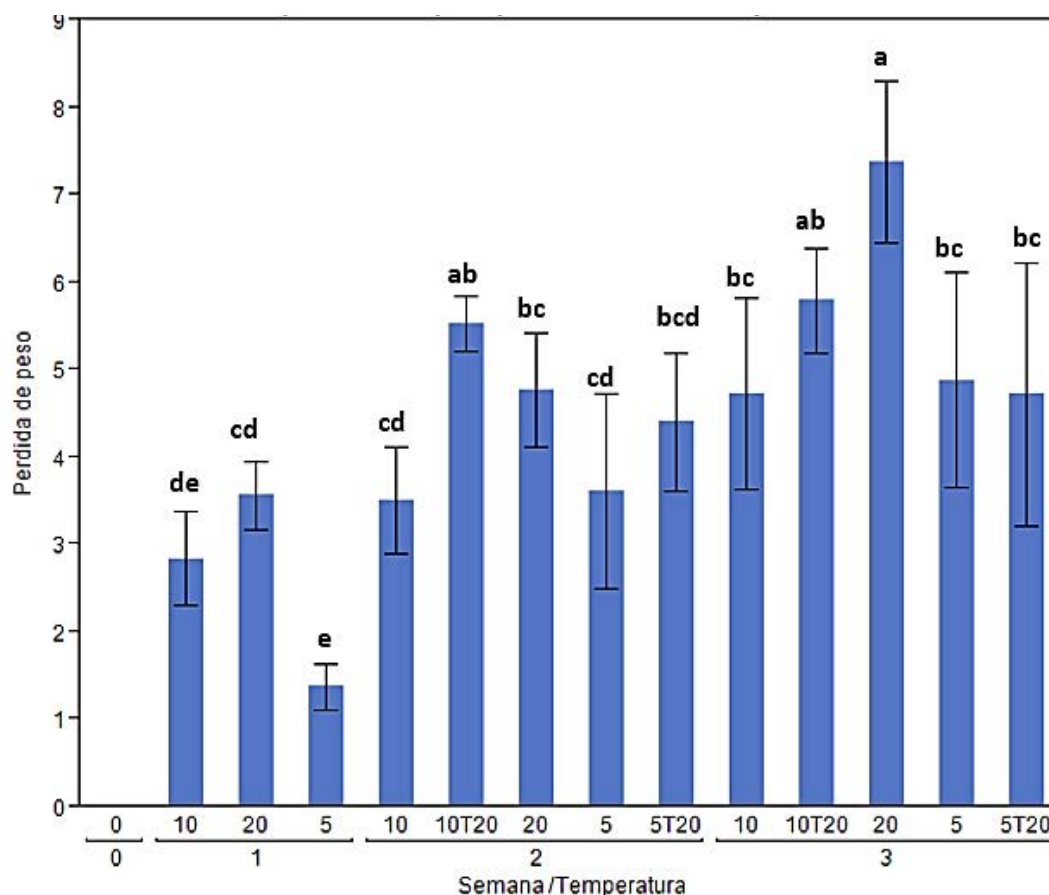
inducir procesos de maduración prematura o desorganizada. Asimismo, el incremento en la fuga de electrolitos confirma la pérdida de integridad de las membranas celulares, constituyendo un indicador clave del daño por frío. Este fenómeno explica la progresión del deterioro observada tanto en la superficie como en la pulpa del fruto.

Cambio en el peso del fruto

El peso inicial de los bananos presentó una media de 172,18 g (pérdida de peso 0, Gráfica 1), con un coeficiente de variación de 17,89, lo que evidencia la heterogeneidad propia del producto comercial incluso dentro de un mismo lote. Esta variabilidad inicial es relevante, ya que puede influir en la dinámica de pérdida de peso durante el almacenamiento, particularmente en relación con la superficie específica y el contenido de agua del fruto.

El análisis estadístico mostró un efecto significativo de los factores tiempo de almacenamiento y temperatura sobre la pérdida de peso ($p < 0,05$). En términos generales, las menores pérdidas se registraron durante los primeros 7 días y en los frutos almacenados a 5 °C. Este comportamiento está asociado a la reducción de la actividad metabólica bajo condiciones de baja temperatura, lo que disminuye tanto la tasa respiratoria como la transpiración (Lufu *et al.*, 2019). Sin embargo, esta aparente ventaja no necesariamente refleja una mejor conservación del fruto. El almacenamiento a 5 °C induce alteraciones fisiológicas importantes, por lo que la menor pérdida de peso responde más a una inhibición metabólica que a la preservación de la calidad del fruto (Zhu *et al.*, 2018).

Gráfica 1. Pérdida de peso (%) de banano almacenado a 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C)



Fuente. Elaboración propia.

En contraste, los frutos almacenados a 20 °C presentaron las mayores pérdidas de peso, especialmente hacia los 14 días de almacenamiento. Bajo estas condiciones, el metabolismo del banano se mantiene activo, favoreciendo una mayor tasa respiratoria y una mayor pérdida de agua por transpiración.

Este comportamiento es característico de frutos climatéricos en proceso de maduración, donde el incremento en la respiración conlleva una mayor liberación de CO² y vapor de agua.

A los 21 días de almacenamiento, esta tendencia se acentúa, observándose las mayores pérdidas de peso tanto en los frutos mantenidos a 20 °C como en aquellos sometidos a transferencia desde 10 °C hacia 20 °C.

En este último caso, el incremento en la pérdida de peso puede explicarse por la reactivación metabólica tras el cambio de temperatura, lo que induce un aumento en la respiración y en la transpiración en tejidos que ya han iniciado su proceso de maduración.

Tabla 2. Pérdida de peso (%) de banano almacenado a 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C)

Días de almacenamiento	Tratamientos y temperaturas de almacenamiento				
	5 °C	10 °C	20 °C	De 5 °C a 20 °C	De 10 °C a 20 °C
7	1,38±0,2	2,85±0,5	4,2±0,4	-	-
14	3,63±1,1	3,51±0,6	6,91±0,6	4,41±0,8	5,52±0,3
21	4,89±1,2	4,74±2,3	6,06±2,1	4,71±0,5	5,79±0,6

*Los valores en la tabla son el promedio de tres repeticiones ± la desviación estándar.

Fuente. Elaboración propia.

Estos resultados muestran que la pérdida de peso está estrechamente relacionada con la actividad fisiológica del fruto, particularmente con la respiración y el balance hídrico. No obstante, su interpretación debe realizarse en conjunto con otros parámetros de calidad. Mientras que a 20 °C la pérdida de peso refleja un proceso de maduración activo, a bajas temperaturas como 5 °C puede coexistir con daño estructural, lo que limita su uso como indicador único de calidad (Prasad *et al.*, 2018).

Pérdida de electrolitos de la cáscara

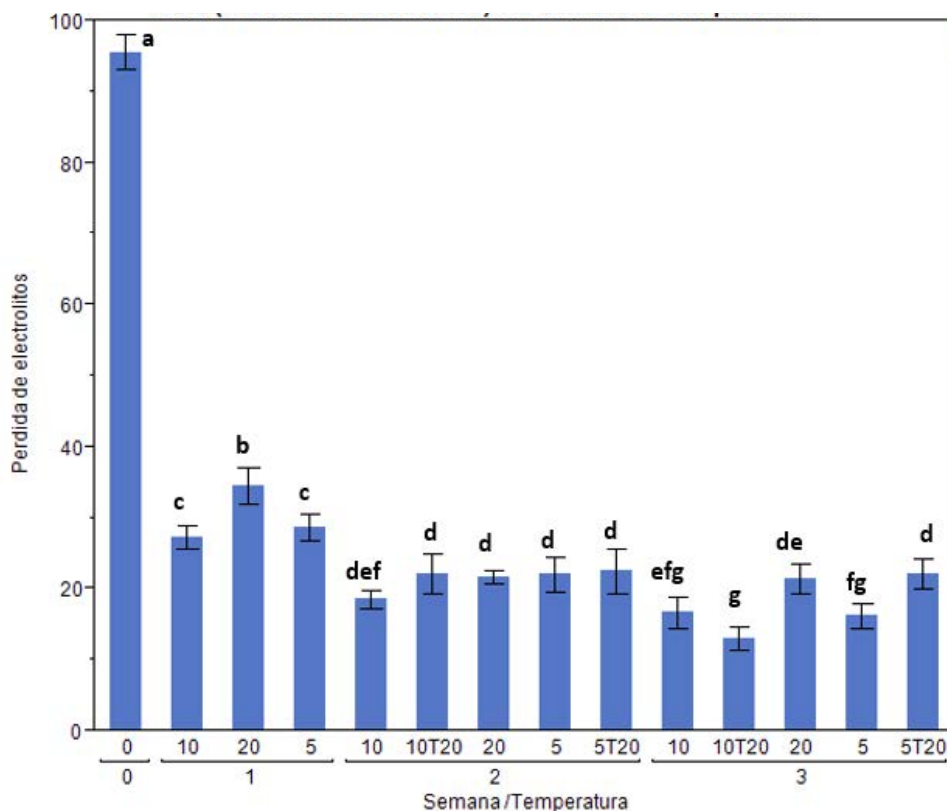
La pérdida de electrolitos mostró una marcada dependencia tanto de la temperatura como del tiempo de almacenamiento, evidenciando su sensibilidad como indicador de daño celular (Gráfica 2). Durante la primera semana, los valores más altos se registraron a 5 °C (28,84%), seguidos por 10 °C (27,28%) y 20 °C (22,53%), lo que indica que las bajas temperaturas inducen una alteración temprana en la integridad de las membranas celulares.

Este comportamiento puede atribuirse a la desorganización de los lípidos de membrana, particularmente a la transición de fase de los fosfolípidos, lo que incrementa la permeabilidad y facilita la fuga de iones.

En la segunda semana, se observó una disminución en la pérdida de electrolitos (22,09 %, 18,62 % y 17,17 % para 5, 10 y 20 °C, respectivamente). Este descenso no sugiere una recuperación del tejido, sino una progresión hacia estados avanzados de deterioro fisiológico, donde la funcionalidad metabólica se encuentra comprometida y la capacidad de respuesta celular al estrés es limitada. Este comportamiento es consistente con tejidos sometidos a daño irreversible por frío.

En los tratamientos de transferencia, los valores de pérdida de electrolitos fueron elevados (22,61 % en 5 → 20 °C y 22,14 % en 10 → 20 °C), lo que confirma que el daño inducido durante el almacenamiento en frío se manifiesta con mayor intensidad al reactivar el metabolismo a temperaturas más altas.

Gráfica 2. Pérdida de electrolitos (%) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5T20 transferencia de 5 a 20 °C; 10T20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

Este fenómeno está estrechamente relacionado con el incremento en la tasa respiratoria, dado que el aumento de temperatura acelera las reacciones metabólicas y la producción de calor, exacerbando el deterioro celular en tejidos previamente afectados.

Durante la tercera semana, los frutos almacenados a 5 °C y 10 °C presentaron valores de 16,26 % y 16,72 %, respectivamente, manteniendo la tendencia decreciente. En contraste, a 20 °C se evidenció un incremento en la pérdida de electrolitos, asociado al avance del proceso de senescencia y sobremaduración.

En condiciones de transferencia, se observó un comportamiento diferencial, donde el tratamiento 5 a 20 °C mantuvo valores elevados (22,7%) de pérdida de electrolitos, mientras que 10 a 20 °C presentó una disminución significativa (13,04%), sugiriendo que el almacenamiento previo a 10 °C preserva en mayor medida la integridad de membranas y reduce el impacto del estrés térmico posterior.

Estos resultados evidencian que la estabilidad de las membranas celulares está fuertemente condicionada por las condiciones de almacenamiento, incluyendo la temperatura,

la humedad relativa, la velocidad del aire y la composición atmosférica. La uniformidad térmica es crítica para evitar fluctuaciones que puedan inducir estrés fisiológico adicional. En este sentido, aunque la refrigeración reduce la tasa respiratoria y prolonga la vida útil, temperaturas inadecuadamente bajas pueden inducir daño por frío (Zhu *et al.*, 2018).

En frutas tropicales como el banano, este tipo de daño ocurre típicamente en el rango de 5 a 14°C, manifestándose en desórdenes fisiológicos como el oscurecimiento, la pérdida de textura y el desarrollo de sabores indeseables (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2018). A nivel celular, estos efectos están asociados con la ruptura de membranas, la pérdida de compartimentalización y el incremento

en la transpiración, lo cual contribuye adicionalmente a la pérdida de agua y al deterioro de la calidad del fruto (El-Hadidy *et al.*, 2016).

Considerando que la conductividad inicial de los bananos fue de $95,61 \pm 2,5 \mu S cm^{-1}$ (Tabla 3), los cambios observados durante el almacenamiento reflejan una alteración progresiva en la integridad estructural del tejido.

En conjunto, la pérdida de electrolitos se consolida como un indicador robusto del daño por frío y permite establecer que temperaturas cercanas a 10 °C representan un compromiso óptimo entre la reducción de la actividad metabólica y la preservación de la integridad celular (Minor & von Horn, 2019).

Tabla 3. Pérdida de electrolitos (%) de banano almacenado a 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C)

Días de almacenamiento	Tratamientos y temperaturas de almacenamiento				
	5 °C	10 °C	20 °C	De 5 °C a 20 °C	De 10 °C a 20 °C
7	28,84±1,9	27,28±1,6	22,53±2,5		
14	22,09±2,4	18,62±1,3	17,17±1,02	22,61±3,2	22,14±2,8
21	16,26±1,8	16,72±2,3	21,6±1,5	22,72±3	13,07±1,7

*Los valores en la tabla son el promedio de tres repeticiones $\pm$ la desviación estándar.

Fuente. Elaboración propia.

Cambios en el color del fruto

La interacción entre los factores tiempo de almacenamiento y temperatura presentó un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) sobre los parámetros de color L^* , a^* y b^* , lo que evidencia la alta sensibilidad del sistema cromático del banano frente a las condiciones de almacenamiento.

El valor inicial del parámetro L^* (65,47) fue significativamente superior al registrado en los tratamientos posteriores (gráfica 3), indicando una mayor luminosidad asociada a un tejido epidérmico íntegro. Durante el almacenamiento, los frutos conservados a 5 °C durante 21 días presentaron los valores más bajos de L^* , reflejando un oscurecimiento pronunciado de la cáscara.

Este comportamiento es consistente con la activación de procesos de pardeamiento enzimático, particularmente la oxidación de compuestos fenólicos catalizada por la polifenol oxidasa, como consecuencia de la pérdida de integridad de las membranas celulares (Selvarajan *et al.*, 2018).

Un patrón similar se observó en los frutos sometidos a transferencia de 5 a 20 °C, a pesar de haber permanecido solo 7 días en condiciones de refrigeración, presentaron reducciones significativas en L^* . Este resultado confirma que la exposición inicial a temperaturas críticas induce desórdenes metabólicos irreversibles que continúan su progresión incluso después del cambio a condiciones más favorables. En este sentido, el oscurecimiento observado no solo responde al tiempo de almacenamiento, sino también a la historia térmica del fruto.

En contraste, los bananos almacenados a 10 °C mostraron una disminución moderada en el parámetro L^* , manteniendo valores significativamente superiores a los observados a 5 °C. Este comportamiento sugiere que, aunque existen alteraciones fisiológicas a 10 °C, estas son menos severas y no comprometen de manera crítica la integridad estructural del tejido. Por su parte, los frutos almacenados a 20 °C conservaron valores de L^* más cercanos a la condición inicial durante las primeras etapas, aunque posteriormente pueden verse afectados por procesos de senescencia.

El análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey confirmó que los tratamientos a 5 °C durante 21 días difieren significativamente de los demás, consolidando esta condición como la más crítica en términos de deterioro visual

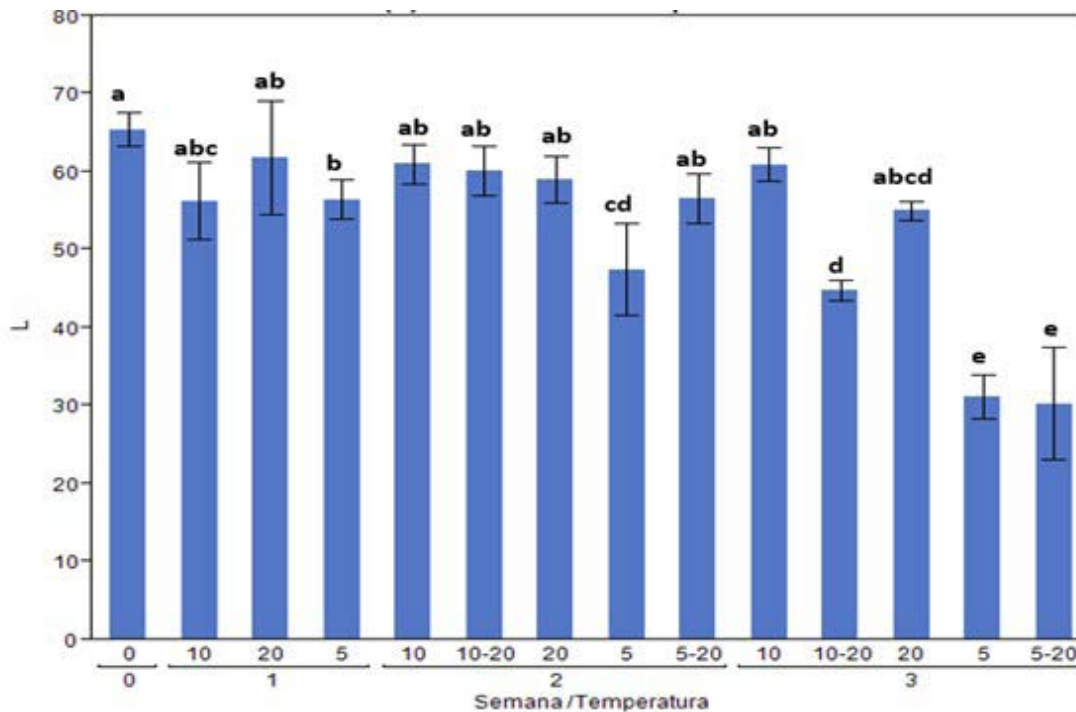
(Gráfica 3). No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos a 10 °C y 20 °C respecto a la medición inicial, lo que refuerza la idea de que estas condiciones permiten preservar en mayor medida la luminosidad del fruto.

El valor inicial del parámetro a^* fue de -5,50 (Gráfica 4), lo que corresponde a la tonalidad verde característica de los frutos en estados tempranos de madurez. A lo largo del almacenamiento, este parámetro aumentó de manera significativa ($p < 0,0001$), indicando una progresiva pérdida del color verde y la transición hacia tonalidades asociadas con la maduración.

Este cambio está directamente relacionado con la degradación de la clorofila, proceso que ocurre de manera más acelerada a temperaturas más altas. En este sentido, los frutos almacenados a 20 °C presentaron los valores más elevados de a^* (8,22), lo cual es consistente con un estado de maduración más avanzado y una mayor actividad metabólica. Bajo estas condiciones, la degradación de clorofila ocurre de forma relativamente ordenada, en concordancia con el comportamiento climatérico del banano (Lobo & Rojas, 2020).

Por su parte, los frutos sometidos a transferencia desde 10 °C a 20 °C no mostraron diferencias significativas respecto a aquellos mantenidos continuamente a 20 °C. Este resultado sugiere que el almacenamiento previo a 10 °C no genera alteraciones irreversibles en los mecanismos asociados a la degradación de la clorofila, permitiendo que el proceso de maduración continúe de manera relativamente normal una vez restablecida la temperatura ambiente.

Gráfica 3. Variación parámetro L^* de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5T20 transferencia de 5 a 20 °C; 10T20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

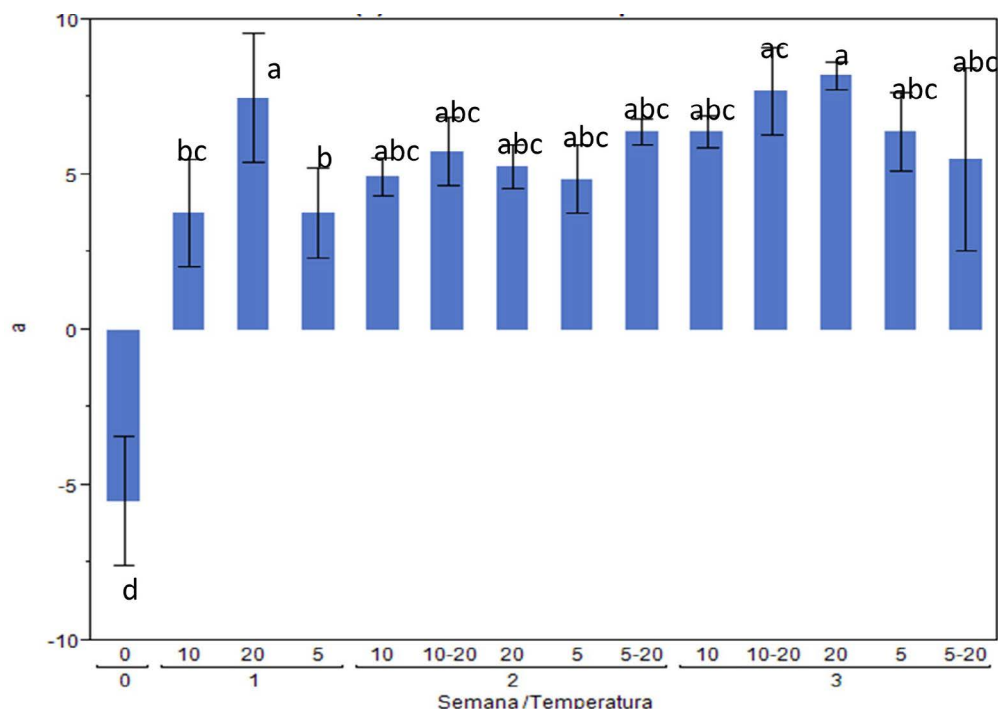
Al analizar el conjunto de tratamientos, no se observa una tendencia completamente definida en la evolución del parámetro a^* en función del tiempo y la temperatura. Este comportamiento puede explicarse porque la pérdida del color verde no depende exclusivamente del proceso de maduración, sino también de alteraciones fisiológicas inducidas por condiciones de estrés (Maduwanthi & Marapana, 2019).

En frutos expuestos a bajas temperaturas, la degradación de clorofila puede ocurrir de forma desorganizada, desacoplada de otros procesos metabólicos, lo que genera variabilidad en los valores de a^* . El parámetro b^* , asociado a la escala cromática azul-amarillo, presentó un valor

inicial de 41,22 (Gráfica 5), coherente con la tonalidad amarilla incipiente de los frutos en estado de madurez temprana. Durante el almacenamiento, este parámetro mostró comportamientos diferenciados en función de la temperatura, reflejando tanto la evolución normal de la maduración como los efectos del estrés térmico.

En los frutos almacenados a 20 °C durante 7 días, los valores de b^* (43,7) se mantuvieron cercanos al inicial, lo que sugiere una progresión adecuada en la síntesis de carotenoides y en el desarrollo del color amarillo característico del banano en maduración. Este comportamiento es consistente con una actividad metabólica activa y coordinada.

Gráfica 4. Variación parámetro a^* de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5-20 transferencia de 5 a 20 °C; 10-20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

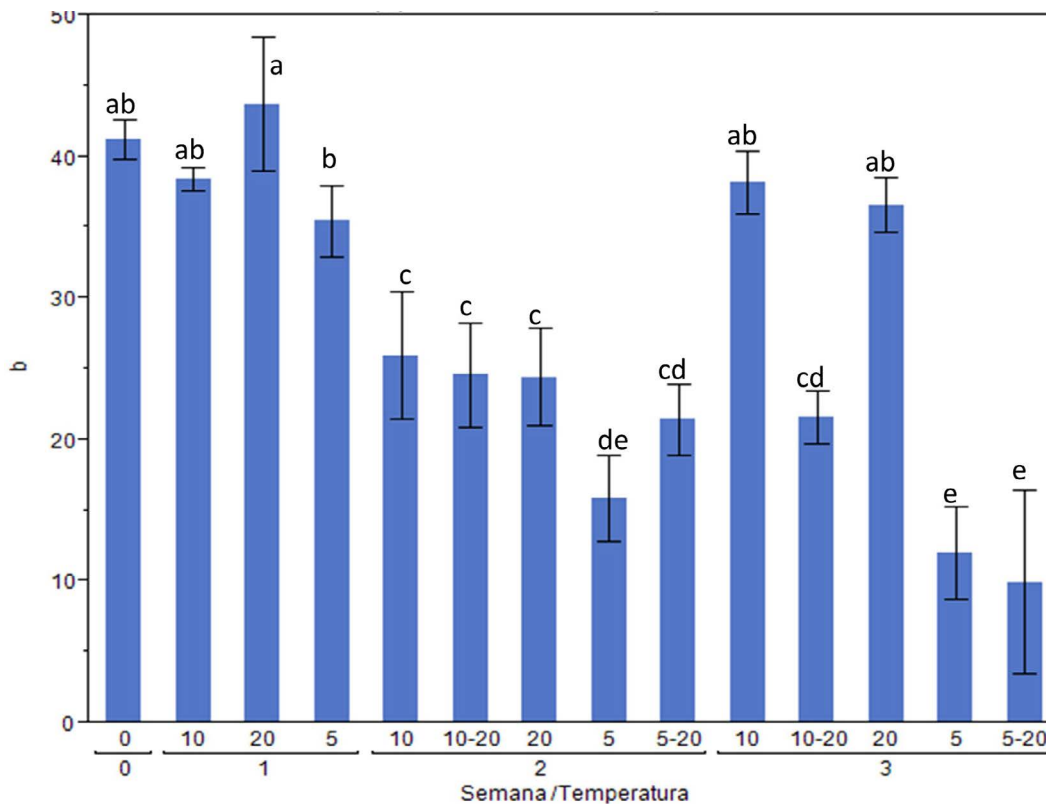
En contraste, los tratamientos a 5 °C mostraron una disminución significativa del parámetro b^* a partir de los 14 días de almacenamiento, tendencia que se acentuó hacia los 21 días, especialmente en los frutos transferidos de 5 °C a 20 °C.

Esta reducción indica una alteración en la expresión del color amarillo, que puede asociarse tanto a la inhibición de la biosíntesis de carotenoides como a procesos de pardeamiento que enmascaran la coloración natural del fruto (Fu *et al.*, 2018). En este contexto, el daño por frío no solo retrasa la maduración, sino que también interfiere con la calidad visual final del producto. Por su parte, los frutos almacenados a 10 °C y aquellos sometidos a

transferencia de 10 a 20 °C no presentaron diferencias significativas respecto a los almacenados a 20 °C. Este comportamiento sugiere que, bajo estas condiciones, la ruta metabólica responsable de la acumulación de pigmentos amarillos se mantiene funcional, permitiendo una evolución del color comparable a la de frutos no sometidos a estrés térmico severo.

El análisis integral de los tres parámetros revela que los cambios en el color del banano no pueden interpretarse de manera aislada. Mientras la disminución de L^* refleja procesos de oxidación y daño celular, el incremento de a^* indica pérdida de clorofila, y la variación de b^* está asociada a la síntesis o degradación de carotenoides.

Gráfica 5. Variación parámetro b^* de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5-20 transferencia de 5 a 20 °C; 10-20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

En condiciones de almacenamiento óptimas (20 °C y en menor medida 10 °C), estos procesos ocurren de manera coordinada, dando lugar a una maduración uniforme. En contraste, a 5 °C se produce una desregulación metabólica, donde la degradación de pigmentos y el pardeamiento ocurren de forma desorganizada, afectando negativamente la calidad visual del fruto (Valenzuela *et al.*, 2017).

Estos resultados están en concordancia con los hallazgos de pérdida de electrolitos, que evidencian daño en las membranas celulares. La desestabilización de estas estructuras facilita el contacto entre enzimas

oxidativas y sus sustratos, promoviendo el pardeamiento y alterando la expresión normal del color (Sun *et al.*, 2020).

Así, el color no solo actúa como un atributo de calidad visual, sino también como un indicador indirecto del estado fisiológico del tejido. Los resultados confirman que temperaturas inferiores a 10 °C inducen alteraciones significativas en la dinámica del color del banano, mientras que el almacenamiento a 10 °C permite mantener un balance entre la reducción de la actividad metabólica y la preservación de la calidad visual, constituyéndose como una condición más adecuada para la conservación poscosecha.

Cambios en la deformación del fruto

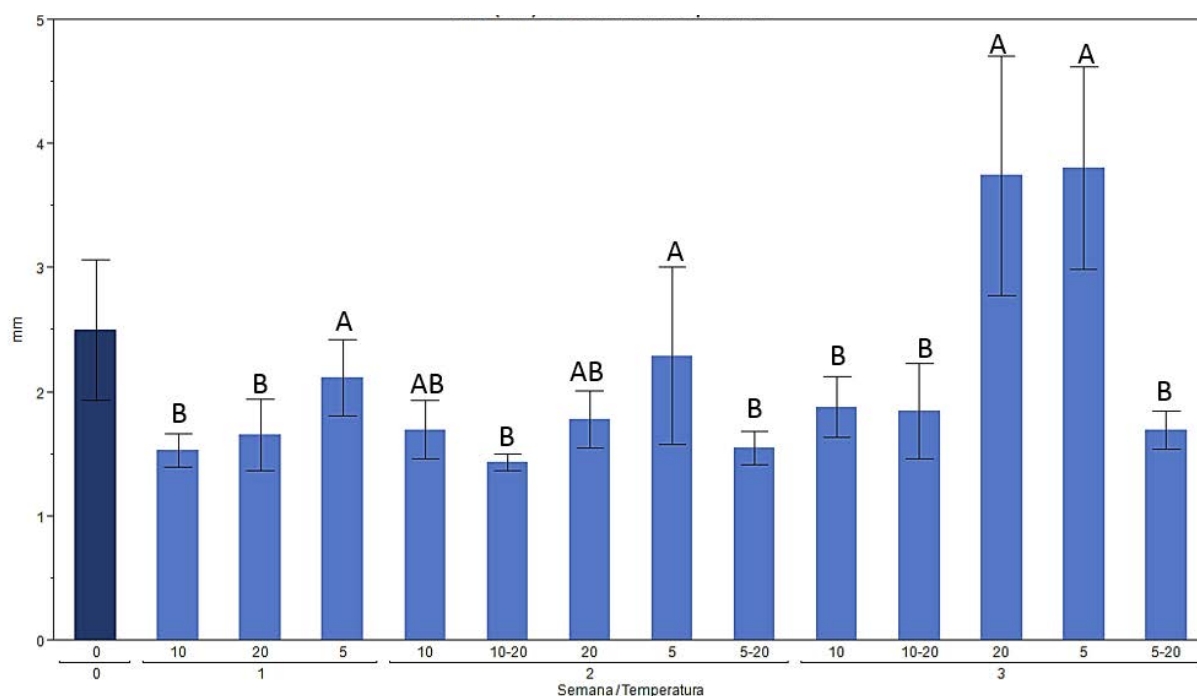
El análisis de varianza evidenció un efecto significativo de la temperatura de almacenamiento sobre la penetración del fruto ($p < 0,001$), confirmando que esta variable es altamente sensible a las condiciones térmicas. La comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) permitió diferenciar claramente el comportamiento de los tratamientos a lo largo del tiempo.

Durante la primera semana, los frutos almacenados a 5°C presentaron los valores más altos de penetración ($2,12 \pm 0,31$ mm) (Gráfica 6), lo que indica una mayor pérdida de firmeza en comparación con las demás condiciones.

Esta tendencia se mantuvo en la segunda semana, donde nuevamente el tratamiento a 5°C registró la mayor deformación ($2,29 \pm 0,71$ mm). Los frutos sometidos a transferencia de 10 a 20°C mostraron los valores más bajos ($1,42 \pm 0,06$ mm), lo que sugiere una mejor conservación de la estructura del tejido bajo estas condiciones.

Para la tercera semana, tanto los frutos almacenados a 5°C como a 20°C presentaron los valores más altos de penetración ($3,80 \pm 0,81$ mm y $3,74 \pm 0,96$ mm, respectivamente), acompañados de una mayor variabilidad. Este comportamiento refleja dos mecanismos distintos de ablandamiento: en el caso de 20°C , asociado a la maduración avanzada del fruto, y en 5°C , relacionado con el deterioro estructural inducido por daño por frío.

Gráfica 6. Cambio en la deformación (mm) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5 , 10 y 20°C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20°C): 5T20 transferencia de 5 a 20°C ; 10T20 transferencia de 10 a 20°C



Fuente. Elaboración propia.

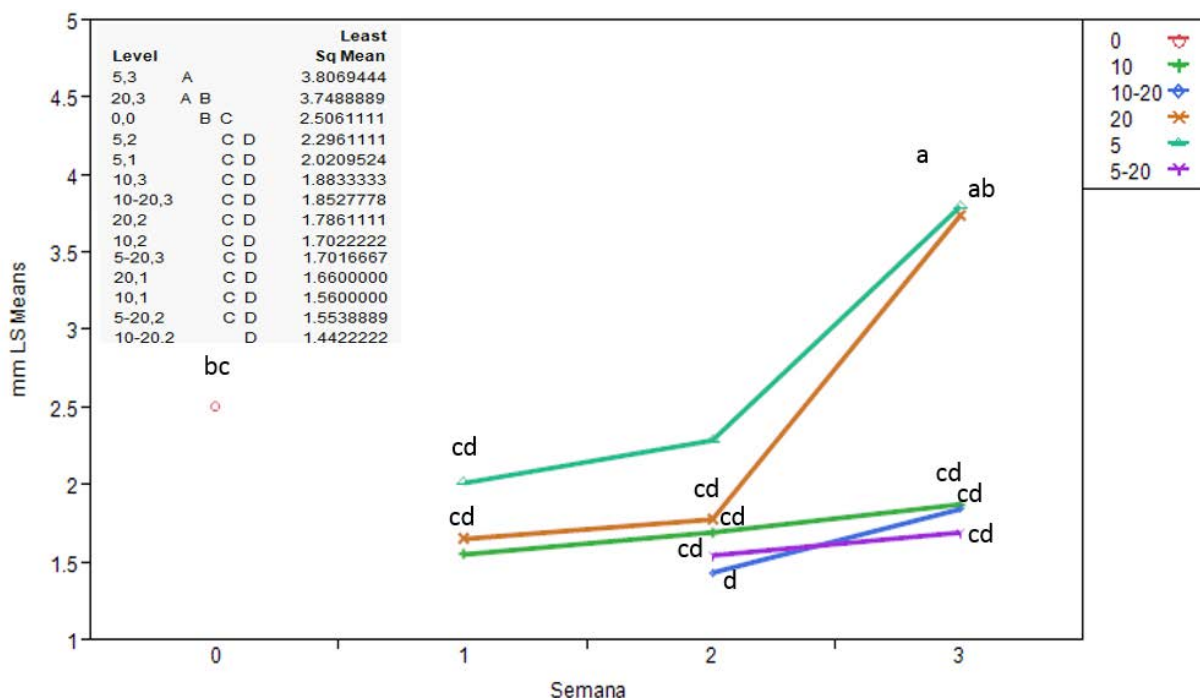
El análisis de la interacción entre tiempo y temperatura confirma esta diferenciación (Gráfico 7). Entre la segunda y tercera semana, los tratamientos a 5 °C y 20 °C mostraron incrementos marcados en la penetración, evidenciando una pérdida acelerada de firmeza. Sin embargo, mientras que a 20 °C este proceso responde a la degradación natural de almidón y polisacáridos de la pared celular durante la maduración (Cordenunsi-Lysenko *et al.*, 2019), en los frutos almacenados a 5 °C está asociado a la desorganización celular causada por el estrés térmico.

En este último caso, el daño por frío induce la pérdida de integridad de las membranas y la activación de enzimas hidrolíticas, incluyendo las amilasas, que favorecen

la degradación del almidón en azúcares simples como glucosa y fructosa (Lo'ay *et al.*, 2020). Este proceso, sumado a la pérdida de turgencia celular, conduce a una textura blanda que no corresponde a un estado de madurez adecuado, sino a un deterioro fisiológico del tejido.

Por el contrario, los frutos almacenados a 10 °C y aquellos sometidos a transferencia hacia 20 °C mostraron menores valores de penetración a lo largo del almacenamiento, lo que indica una mayor conservación de la firmeza. Este comportamiento puede atribuirse a una menor intensidad de los procesos metabólicos y a la ausencia de daño estructural severo, permitiendo que el tejido mantenga su integridad por más tiempo.

Gráfica 7. Efecto de la interacción tiempo y temperatura en la penetración (mm) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C)



Fuente. Elaboración propia.

Efecto de la temperatura y el tiempo en la dureza

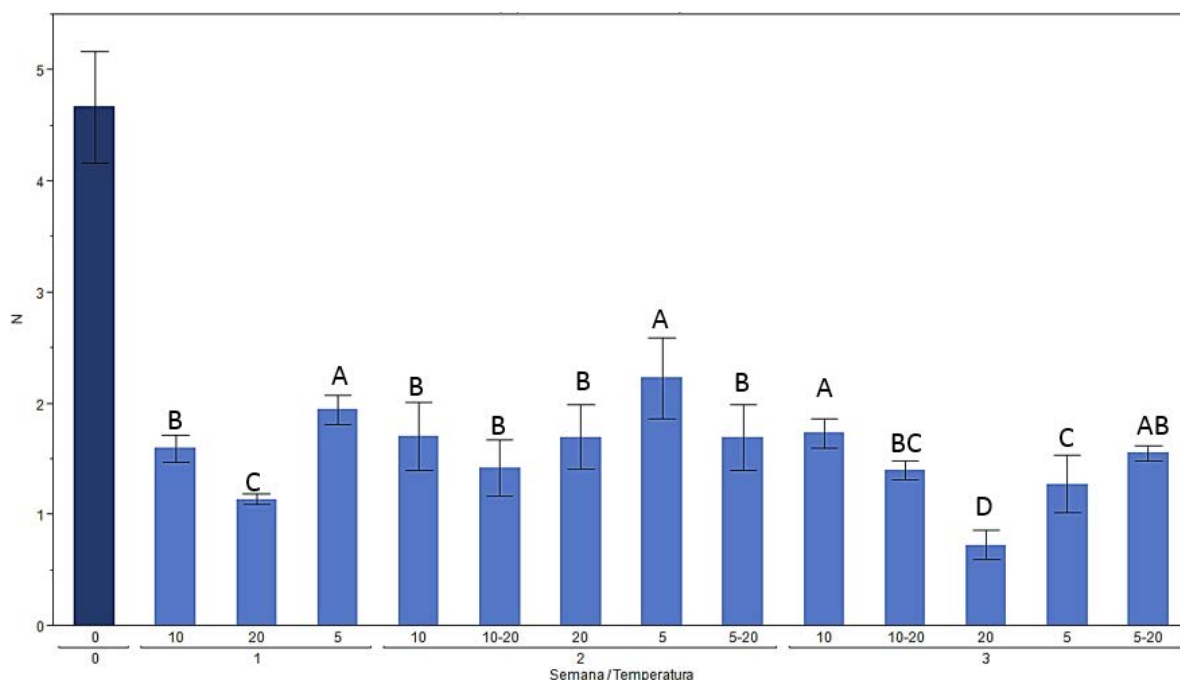
El análisis de varianza evidenció un efecto significativo de la temperatura de almacenamiento sobre la dureza del fruto ($p < 0,001$), confirmando que esta variable responde de manera directa a las condiciones térmicas. La comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) permitió establecer diferencias claras entre tratamientos desde las primeras etapas de almacenamiento.

Durante la primera semana, los frutos almacenados a 20 °C presentaron la menor dureza ($1,14 \pm 0,05$ N), con diferencias significativas respecto a los tratamientos a 10 °C ($1,60$ N) y 5 °C ($1,95$ N).

Este comportamiento es consistente con la activación del proceso de maduración climática, en el cual la firmeza disminuye debido a la degradación de componentes estructurales de la pared celular, como pectinas y hemicelulosas, mediada por enzimas hidrolíticas. Este proceso está estrechamente asociado a la conversión de almidón en azúcares solubles, característica fundamental del ablandamiento del banano (Kaur *et al.*, 2020).

En el Gráfico 8 se presenta el cambio de dureza en los frutos de banano. Hacia la tercera semana, la dureza disminuyó de manera marcada en los frutos almacenados tanto a 20 °C ($0,73 \pm 0,13$ N) como a 5 °C ($1,28 \pm 0,25$ N), aunque por mecanismos distintos. En el caso de 20 °C, la pérdida

Gráfica 8. Cambio de la dureza (N) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5-20 transferencia de 5 a 20 °C; 10-20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

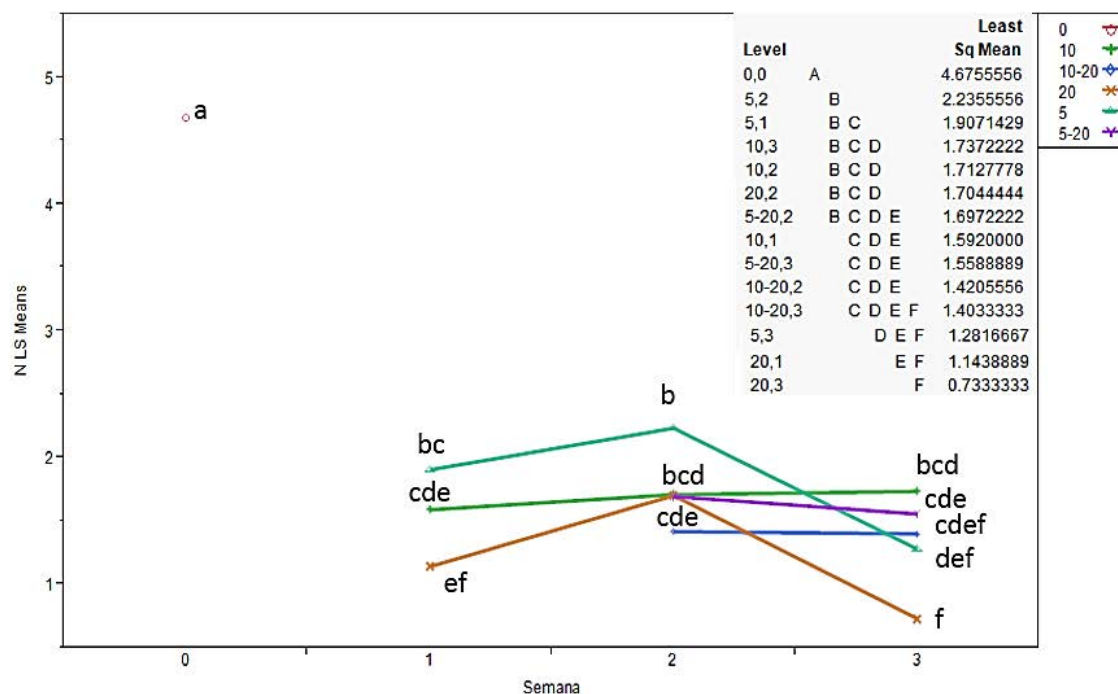
de firmeza responde a una maduración avanzada y a la degradación progresiva de la matriz celular. Por el contrario, en los frutos almacenados a 5 °C, la disminución de la dureza está asociada al daño por frío, el cual compromete la integridad de las membranas y altera el metabolismo de la pared celular, generando una textura blanda pero estructuralmente deteriorada.

El análisis de la interacción entre tiempo y temperatura confirma esta dualidad (Gráfica 9). Los frutos almacenados a 20 °C mostraron una reducción continua de la dureza a lo largo del tiempo, coherente con un proceso de maduración normal. En contraste, los frutos a 5 °C, aunque inicialmente mantuvieron mayor firmeza, presentaron una caída significativa en etapas posteriores, lo que sugiere una

pérdida progresiva de integridad celular más que un proceso de maduración controlado. Estudios recientes han mostrado que el almacenamiento a bajas temperaturas puede alterar el metabolismo de la pared celular e incluso inducir procesos como la lignificación o la inhibición de la degradación de polisacáridos, afectando de manera anómala la textura del fruto (Murmú & Mishra, 2018).

En comparación, los frutos almacenados a 10 °C presentaron un comportamiento intermedio, conservando mayores valores de dureza durante el almacenamiento. Esto sugiere que a 10 °C la degradación estructural ocurre de manera más lenta y sin la interferencia severa del daño por frío, permitiendo una mejor conservación de la firmeza.

Gráfica 9. Efecto de la interacción tiempo y temperatura en la penetración (mm) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C)



Fuente. Elaboración propia.

La relación entre dureza y penetración refuerza esta interpretación. Ambos parámetros describen la resistencia del tejido, pero desde perspectivas complementarias: mientras la penetración refleja la deformabilidad local, la dureza integra la resistencia global del fruto. Valores bajos de dureza pueden corresponder tanto a frutos en estado óptimo de maduración como a tejidos deteriorados por estrés térmico (Maduwanthi & Marapana, 2019), por lo que su interpretación debe realizarse en conjunto con otros indicadores fisiológicos. Las modificaciones en la textura, evaluadas mediante penetración y dureza, mostraron una estrecha relación con los resultados de las demás variables analizadas. En condiciones de 20 °C, la pérdida de firmeza estuvo asociada al proceso normal de maduración, caracterizado por la degradación de almidón y polisacáridos de la pared celular. Sin embargo, en los frutos almacenados a 5 °C, el incremento en la penetración y la disminución de la dureza no correspondieron a una maduración fisiológica, sino a un deterioro estructural derivado del daño por frío. La pérdida de integridad de membranas y la desorganización celular contribuyeron a una textura blanda, de baja calidad, lo cual coincide con los mayores niveles de fuga de electrolitos observados en estos tratamientos (Sañudo-Barajas *et al.*, 2019).

Conclusiones

Los resultados confirman que la temperatura de almacenamiento es un factor crítico en la conservación postcosecha del banano, con implicaciones directas para el

diseño y la gestión de la cadena de frío. El almacenamiento a 5 °C induce daño por frío irreversible, evidenciado por la pérdida de integridad de membranas, alteraciones en el color y la textura, y un deterioro acelerado tras la transferencia a temperaturas de comercialización. Esto implica que exposiciones, incluso cortas, a temperaturas por debajo del umbral fisiológico pueden comprometer la calidad final del fruto, generando pérdidas económicas significativas en mercados de exportación. Por otro lado, el almacenamiento a 20 °C favorece una maduración rápida, lo que limita la vida útil y reduce la ventana logística para la distribución y comercialización. En contraste, el almacenamiento a 10 °C emerge como una condición más adecuada, al permitir un control efectivo de la tasa metabólica sin inducir desórdenes fisiológicos severos, preservando así atributos clave de calidad.

Desde una perspectiva operativa, estos hallazgos resaltan la necesidad de mantener una temperatura uniforme y controlada a lo largo de toda la cadena de suministro, evitando fluctuaciones térmicas y rupturas en la cadena de frío. Asimismo, subrayan la importancia de ajustar protocolos de almacenamiento, transporte y distribución en función de los umbrales de tolerancia del banano, con el fin de maximizar su vida útil, reducir pérdidas poscosecha y garantizar la calidad en mercados internacionales.

Agradecimiento

JDHL agradece al Dr. Edmundo Mercado Silva y al PROPAC (UAQ) por facilitar las muestras, espacios de laboratorio y el equipo para realizar las mediciones, así como a los compañeros de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la UAQ, promoción 2015, con quienes se realizaron las mediciones en laboratorio. DGOP y JDHL agradecen a CONACYT México por la beca otorgada para los estudios de posgrado durante el tiempo en que se escribió este artículo.

Referencias

- Cordenunsi-Lysenko, B. R., Nascimento, J. R. O., Castro-Alves, V. C., Purgatto, E., Fabi, J. P., y Peroni-Okita, F. H. G. (2019). The starch is (not) just another brick in the wall: The primary metabolism of sugars during banana ripening. *Frontiers in Plant Science*, 10, 452915. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00391>
- Der Agopian, R. G., Peroni-Okita, F. H. G., Soares, C. A., Mainardi, J. A., Do Nascimento, J. R. O., Cordenunsi, B. R., Lajolo, F. M., y Purgatto, E. (2011). Low temperature induced changes in activity and protein levels of the enzymes associated to conversion of starch to sucrose in banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 62(2), 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.008>
- El-Hadidy, G. A., Mshraky, A. M., y Ali, E. Z. (2016). An Attempt to Prolong the Cold Storage of Green Banana Fruits using some Safe Treatments to Reduce the Chilling injury. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 6(4), 833–841.
- Fu, X., Cheng, S., Liao, Y., Huang, B., Du, B., Zeng, W., Jiang, Y., Duan, X., y Yang, Z. (2018). Comparative analysis of pigments in red and yellow banana fruit. *Food Chemistry*, 239, 1009–1018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.046>
- He, W. Di, Gao, J., Dou, T. X., Shao, X. H., Bi, F. C., Sheng, O., Deng, G. M., Li, C. Y., Hu, C. H., Liu, J. H., Zhang, S., Yang, Q. S., y Yi, G. J. (2018). Early cold-induced peroxidases and aquaporins are associated with high cold tolerance in Dajiao (Musa spp. 'Dajiao'). *Frontiers in Plant Science*, 9, 323137. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00282>
- Kaur, L., Dhull, S. B., Kumar, P., y Singh, A. (2020). Banana starch: Properties, description, and modified variations - A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165 (PB), 2096–2102. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.058>
- Li, D., Limwachiranon, J., Li, L., Du, R., y Luo, Z. (2016). Involvement of energy metabolism to chilling tolerance induced by hydrogen sulfide in cold-stored banana fruit. *Food Chemistry*, 208, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.113>

- Liu, J., Li, Q., Chen, J., y Jiang, Y. (2020). Revealing further insights on chilling injury of postharvest bananas by untargeted lipidomics. *Foods*, 9 (7). <https://doi.org/10.3390/foods9070894>
- Lo'ay, A. A., Hamed, S. E., EL-Khateeb, A. Y., y Mohamed, A. H. (2020). Implementation exogenous ATP on the starch degradation enzyme activities of 'Grand Nain' banana fruit during shelf life. *Scientia Horticulturae*, 262, 109021. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109021>
- Lobo, M. G., y Rojas, F. J. F. (2020). Biology and postharvest physiology of banana. En Siddiq, M., Ahmed, J., Lobo, M. G. (Eds.), *Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition* (pp. 19–44). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119528265.ch2>
- Lufu, R., Ambaw, A., y Opara, U. L. (2019). The contribution of transpiration and respiration processes in the mass loss of pomegranate fruit (cv. Wonderful). *Postharvest Biology and Technology*, 157, 110982. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110982>
- Maduwanthi, S. D. T., y Marapana, R. A. U. J. (2019). Induced Ripening Agents and Their Effect on Fruit Quality of Banana. *International Journal of Food Science*, 2019(1), 2520179. <https://doi.org/10.1155/2019/2520179>
- Minor, T., y von Horn, C. (2019). Rewarming Injury after Cold Preservation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2059. <https://doi.org/10.3390/ijms20092059>
- Murmu, S. B., y Mishra, H. N. (2018). Post-harvest shelf-life of banana and guava: Mechanisms of common degradation problems and emerging counteracting strategies. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.011>
- Patel, B., Tandel, Y. N., Patel, A. H., y Patel, B. L. (2016). Chilling injury in tropical and subtropical fruits: a cold storage problem and its remedies: a review. *International Journal of Science, Environment*, 5 (4), 1882–1887.
- Pott, D. M., Vallarino, J. G., y Osorio, S. (2020). Metabolite Changes during Postharvest Storage: Effects on Fruit Quality Traits. *Metabolites*, 10(5), 187. <https://doi.org/10.3390/metabo10050187>
- Prasad, K., Jacob, S., y Siddiqui, M. W. (2018). Fruit Maturity, Harvesting, and Quality Standards. *Preharvest Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable Quality*, 41–69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809807-3.00002-0>
- Ramírez-Sánchez, M., Huber, D. J., y Vallejos, C. E. (2018). Comparison of tissue deterioration of ripening banana fruit (*Musa* spp., AAA group, Cavendish subgroup) under chilling and non-chilling temperatures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(12), 4644–4652. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8994>

- Sañudo-Barajas, A. A., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Vélez de la Rocha, R., Noguera-Artiaga, L., Sánchez-Rodríguez, L., Carbonell-Barrachina, Á. A., y Hernández, F. (2019). Texture. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 293–314. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00014-2>
- Selvarajan, E., Veena, R., y Manoj Kumar, N. (2018). Polyphenol oxidase, beyond enzyme browning. En Singh, J., Sharma, D., Kumare, G., Sharma, N. R. (Ed.), *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development* (pp 203–222). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0053-0_10
- Sousa-Gallagher, M. J., Tank, A., y Sousa, R. (2016). Emerging Technologies to Extend the Shelf Life and Stability of Fruits and Vegetables. En Subramaniam, P. (Ed.), *The Stability and Shelf Life of Food* (pp. 399–430). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100435-7.00014-9>
- Sun, H., Jun, Luo, M., Li, Zhou, X., Zhou, Q., y Ji, S. Juan. (2020). Influence of Melatonin Treatment on Peel Browning of Cold-Stored “Nanguo” Pears. *Food and Bioprocess Technology*, 13 (8), 1478–1490. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02489-8>
- Valenzuela, J. L., Manzano, S., Palma, F., Carvajal, F., Garrido, D., y Jamilena, M. (2017). Oxidative Stress Associated with Chilling Injury in Immature Fruit: Postharvest Technological and Biotechnological Solutions. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(7), 1467. <https://doi.org/10.3390/ijms18071467>
- Zhang, C., Ding, Z., Xu, X., Wang, Q., Qin, G., y Tian, S. (2009). Crucial roles of membrane stability and its related proteins in the tolerance of peach fruit to chilling injury. *Amino Acids*, 39(1), 181–194. <https://doi.org/10.1007/s00726-009-0397-6>
- Zhang, J., Cheng, D., Wang, B., Khan, I., y Ni, Y. (2017). Ethylene Control Technologies in Extending Postharvest Shelf Life of Climacteric Fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (34), 7308–7319. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02616>
- Zhu, X., Luo, J., Li, Q., Li, J., Liu, T., Wang, R., Chen, W., y Li, X. (2018). Low temperature storage reduces aroma-related volatiles production during shelf-life of banana fruit mainly by regulating key genes involved in volatile biosynthetic pathways. *Postharvest Biology and Technology*, 146, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.015>

The addition of *Jatropha* proteins and bentonite modified the mechanical and barrier properties of a soy protein film

La adición de proteínas de *Jatropha* y bentonita modificó las propiedades mecánicas y de barrera de una película de proteína de soja

Sierra-Sarmiento, M. A., Hurtado-Amado, N., Espitia-Vasquez, R. A. y Hoyos-Leyva, J. D.*

Grupo de Investigación e Innovación en Ingeniería Agroindustrial - GINNA, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / Fecha de aceptación: julio de 2020

Abstract

The effect of the proportion of isolated protein from *Jatropha curcas* L. and *Glycine max* L. on the mechanical and barrier properties of cast films, nanoreinforced with bentonite, was tested. The cast films were prepared with different proportions of *Jatropha*/soy isolated protein (2.5%/97.5% and 5%/95%, respectively). Additionally, different concentrations of bentonite (0.1% and 0.06%) and a constant quantity of glycerol (0.4 g/g of protein) were added.

It was found that the concentration of the reinforcement and the protein significantly affect the mechanical properties of the polymeric films, the best formulation being that of 2.5% of *Jatropha* protein and 0.0625% of bentonite, with breaking stress values of 0.87 ± 0.076 MPa, Young's modulus of 48.4 ± 3.3 MPa, and a percentage of elongation of $35.1 \pm 5.2\%$.

The barrier properties were significantly improved with this same formulation, showing moisture content levels of $19.1 \pm 0.7\%$, a swelling percentage of $84.6 \pm 2.8\%$, and permeability values of $0.007 \pm 0.0001\%$. Characterization by infrared spectroscopy made it possible to identify the presence of functional groups and the interactions of the compounds present in the polymeric films. The addition of bentonite to the protein matrix significantly improves the mechanical and barrier properties of the films.

Keywords: Bentonite, polymeric, glycerol, spectroscopy, *Jatropha*, *Glycine max*.

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

Resumen

Se evaluó el efecto de la proporción de proteína aislada de *Jatropha curcas* L. y *Glycine max* L. en las propiedades mecánicas y de barrera de películas moldeadas, nanorreforzadas con bentonita. Las películas se prepararon con diferentes proporciones de proteína aislada de *Jatropha*/soja (2,5 %/97,5 % y 5 %/95 %, respectivamente). Además, se añadieron diferentes concentraciones de bentonita (0,1 % y 0,06 %) y una cantidad constante de glicerol (0,4 g/g de proteína).

Se observó que la concentración del refuerzo y de la proteína afectan significativamente las propiedades mecánicas de las películas poliméricas. La mejor formulación fue la de 2,5 % de proteína de *Jatropha* y 0,0625 % de bentonita, obteniéndose valores de resistencia a la rotura de $0,87 \pm 0,076$ MPa, módulo de Young de $48,4 \pm 3,3$ MPa y porcentaje de elongación de $35,1 \pm 5,2$ %.

Las propiedades de barrera mejoraron significativamente con esta misma formulación, presentando niveles de humedad de $19,1 \pm 0,7$ %, un porcentaje de hinchamiento de $84,6 \pm 2,8$ % y valores de permeabilidad de $0,007 \pm 0,0001$ %. La caracterización mediante espectroscopia infrarroja permitió identificar la presencia de los grupos funcionales y las interacciones de los compuestos presentes en las películas poliméricas. La adición de bentonita a la matriz proteica mejora significativamente las propiedades mecánicas y de barrera de las películas.

Palabras clave: bentonita, polimérico, glicerol, espectroscopia, *Jatropha*, *Glycine max*.

Introduction

Conventionally, the materials used to obtain packaging in the food industry come from non-renewable petroleum resources, and this has been generating great concern due to the non-biodegradability of these materials and their significant environmental impact. In response to this problem, research on biodegradable biopolymers made from renewable resources has been recently strengthened (Medina-Jaramillo, Ochoa-Yepes, Bernal, & Famá, 2017; Panseri *et al.*, 2018).

The most used substances to obtain these biopolymer matrices include proteins, alginates, pectins, starches, cellulose derivatives, and other polysaccharides. Protein sources include wheat gluten, corn zein, soy protein, collagen, gelatin, keratin, casein, and whey proteins, which can be used as polymeric materials in the food industry through techniques such as pour plate or compression molding (Atarés & Chiralt, 2016; Garavand *et al.*, 2017).

Soy contains around 40% of protein, which makes it one of the sources with the greatest potential for obtaining biodegradable films (Lambrecht *et al.*, 2018). Other promising protein sources include *Jatropha curcas* L, which is a plant that produces non-edible seeds that have been used for oil extraction in biodiesel production. From the oil extraction process, a protein-rich cake results as a by-product, which contains between 19 and 30% of protein (Abdul-Khalil *et al.*, 2013).

Osorio-Ruiz *et al.* (2017) reported the morphological, as well as some physical and functional, properties of biofilms made with *Jatropha* and soy protein; these authors found that soy protein films had higher resistance to distortion than *jatropha* films, but the latter had lower permeability due to its amino acid composition. The mechanical and the barrier properties of the films are affected by environmental conditions such as humidity due to the hydrophilic nature of proteins (Rhim, Park, & Ha, 2013).

In this sense, there are different strategies to improve the mechanical and barrier properties of films made with biopolymers, such as the use of mixtures of different materials (protein, carbohydrates, gums, etc.), the addition of plasticizers, and nanoreinforcements, such as the addition of nanoclays (for example, bentonite), among others. Nanoclays have been used to improve the physical-mechanical characteristics of biofilms (Rhim *et al.*, 2013) due to the interactions between the nanoclay and the internal structure of the proteins that make up the polymeric matrix through hydrogen bonds (Monteiro *et al.*, 2018).

The overall performance of polymer films depends on factors such as matrix compatibility, the type of nanocomposite (Wakai & Almenar, 2015), the production method of the film, and the percentage of nanocomposite used, among others (Yun, Youn, Shin, & Yoon, 2017).

Therefore, the aim of this study was to determine the effect of the mixture of soy and *Jatropha* protein isolates on the mechanical and barrier properties of biofilms prepared by casting.

Additionally, the effect of the addition of bentonite at different concentrations on the physical-mechanical and barrier properties of polymer films obtained from mixtures of *Jatropha* and soy protein isolates was evaluated.

Materials and methods

Pre-treatment of raw materials

Initially, before film production, the raw materials were pretreated as follows. The *Jatropha* protein was isolated following the methodology proposed by Popovi, Perin, Vaštag, Lazi, & Popovi (2012) from a *Jatropha* seed cake obtained after oil extraction by extrusion. The soy protein isolate was purchased from Laboratorio Hunivor S.A. (Bogota D.C., Colombia). The bentonite was activated through a modified thermo-acid treatment proposed by Elfadly, Zeid, Yehia, Abouelela & Rabie (2017) in order to modify the surface of the clay. Briefly, the bentonite was dispersed in a solution containing citric and sulfuric acid; this solution was heated for 3 hours at a temperature of 80°C and then allowed to cool to room temperature and centrifuged to remove the activated clay.

Amino acid profile of jatropha and soy protein

The *Jatropha* and soy isolated proteins were hydrolyzed and analyzed to determine their amino acid composition, following the AOAC 994.12 method (AOAC, 2005). The chromatography was carried out using an Agilent 1100 (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA) series instrument.

Cast film preparation

Polymeric films were obtained by mixing *Jatropha* and soy protein concentrates (5%/95% and 2.5%/97.5%, respectively) with glycerol at a concentration of 0.4 g/g of protein isolate (Popovi *et al.*, 2012), which was used as a plasticizer, and 0.0625% (w/w) and 0.125% (w/w) of bentonite as a reinforcing agent. The cast films were made using the casting method proposed by González, Strumia, & Alvarez Igarzabal (2011).

The bentonite and glycerol were dispersed in 10 mL of deionized water and subjected to sonication for 10 min at room temperature. Simultaneously, the soy and *Jatropha* proteins were dispersed in 40 mL of deionized water; the pH was adjusted to 10 with NaOH (0.1 M). The solutions were then mixed by stirring for 10 min, after which the mixture was sonicated for 10 min at room temperature and stirred continuously for 30 min at a temperature of 75°C. The mixture was sonicated for 10 min and finally poured into molds measuring 20 cm x 4 cm x 0.05 mm, and the films were dried at room temperature for 48 hours.

Mechanical properties of the cast films

The mechanical tests of the films were performed using a Universal WDW-20E machine with a maximum load of 200 N and a strain tension velocity of 5 mm/min. The cast films were evaluated in terms of their mechanical characteristics, namely modulus of elasticity and tensile strength, according to ASTM standard D882-10 (ASTM, 2010).

Barrier properties

The steam transfer rate barrier characteristic was based on a modified method of ASTM standard E96-80; the percentage of swelling (S (%)) was determined according to the methodology proposed by Rhim *et al.* (2013).

Briefly, films were cut into square samples (25.4 mm x 50 mm) and were immersed in water. The initial and final weights were recorded, and the swelling was calculated from the following equation:

$$S(\%) = \frac{m_t - m_o}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

Where m_o was the initial weight and m_t the final weight after film immersion.

Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis

The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) of the polymeric films was carried out using a Cary 630 FTIR instrument (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA) equipped with an ATR accessory to analyze solid samples. The wavelength range of the analysis was 650 to 4000 cm^{-1} and 4 cm^{-1} of resolution; 72 scans were performed for each sample.

Statistical analysis

All experiments were carried out in triplicate. The reported values were means $\pm$ standard error (SE). The data were analyzed by means of a one-way analysis of variance (ANOVA) using the software MATLAB R2009b; when statistically significant differences were found

(p value < 0.05), a Tukey test was applied in order to determine multiple differences between the means.

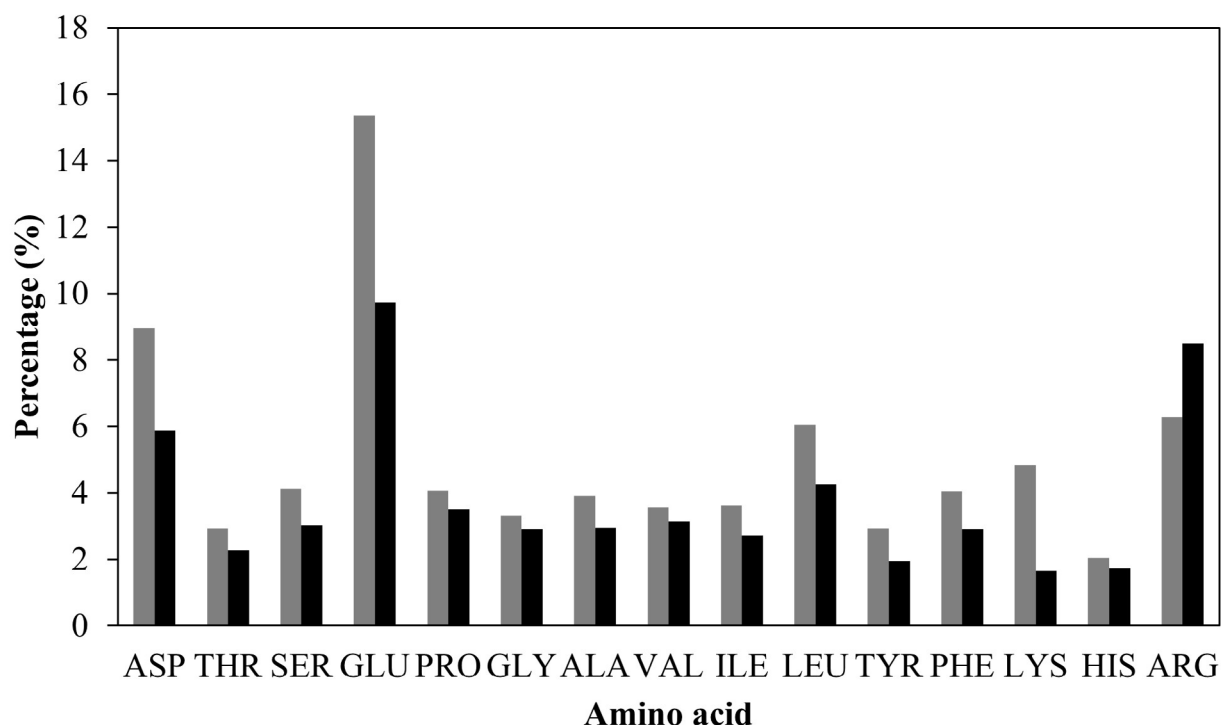
Results and discussion

Amino acid profile of soy and *Jatropha* protein isolates

According to the chromatographic analysis of the soy and *Jatropha* protein isolates, the most abundant amino acid was glutamic acid, with values of 15.36% and 9.7%, respectively (Figure 1). Other amino acids at high concentrations include aspartic acid (8.96%, 5.88%) and arginine (6.28%, 8.51%). In contrast, the lowest quantities were found for tyrosine (2.94%, 1.95%) and histidine (2.04%, 1.72%).

The amino acid composition of the proteins used for film-forming purposes has been reported to affect the mechanical and barrier properties of the final product (Guerrero *et al.*, 2010). The amino acid composition of *Jatropha* protein revealed the presence of arginine, lysine, proline, histidine, tyrosine, threonine, and serine.

These amino acids had been reported to form hydrogen bonds that allow for greater protein cross-linking within the polymer matrix in the presence of functional groups such as OH, NH, and COOH (Guerrero *et al.*, 2010). The formation of a macromolecular network depends on these amino acids, offering stability to new bonds within the polymer matrix in a 3D-network.

Figure 1. Amino acid composition of *Jatropha* (black bars) and soy (gray bars) proteins

Source. Own elaboration.

Effect of the concentration of the nanoreinforcement and percentage of *J. curcas* L. protein on the deformation characteristics of films

The breaking tension, Young's modulus, and elongation at break were studied as mechanical properties of protein films (Table 1).

As shown in Table 1, the bentonite and *Jatropha* protein concentration significantly affect the mechanical properties of the polymeric films ($p < 0.05$). The breaking tension and the modulus of elasticity increased with the addition of nanoreinforcement, up to a maximum value of 0.87 ± 0.08 MPa and 48.4 ± 3.3 MPa, respectively, in the film formed by 2.5% *Jatropha* protein and 0.0625% bentonite.

This improvement can be attributed to the increase in the stiffness of the film given by the interaction of the nanoreinforcement, as well as the high affinity and interaction between the polymeric matrix of the *Jatropha* and soy proteins, and the dispersion of the bentonite (Rhim, 2011; Saurabh *et al.*, 2015). The data agrees with previous studies where improvements were found in the mechanical characteristics by incorporating nanoreinforcements into polymeric matrices, such as chitosan (Yun *et al.*, 2017), starch (Wang *et al.*, 2018), and cellulose (Lee, Kim, & Ha, 2017).

The flexibility of a film is measured by its characteristic of elongation at break and is defined as the ability of the film to deform before breaking.

It was possible to demonstrate in this study that the nanoreinforcement and the *Jatropha* protein significantly affected the elongation of the films ($p < 0.05$); it was found that the films used as control showed elongation percentage values of 26.6 ± 5.0 and 15.9 ± 2.1 for films made with 2.5% and 5% *Jatropha* protein, respectively, whereas films obtained with 2.5% *Jatropha* protein and 0.0625% bentonite nanoreinforcement presented the maximum elongation percentage of 35.1 ± 5.2 .

However, an increase in the percentage of bentonite and *jatropha* protein decreased the film's elongation property.

The trend in the effect of bentonite addition was consistent with that reported in previous studies (Chrissafis, *et al.*, 2007; Saurabh *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2016), where an increase in clay nanoreinforcements causes a less flexible film but induces a greater breaking tension.

Table 1. Mechanical properties of cast films made with a mixture of *Jatropha* (J) and soy isolated proteins, nanoreinforced with bentonite (B)

Treatment	Breaking tension (MPa)	Young's modulus	Tratamientos
2.5%J_0%B	0.53 ± 0.06^a	17.4 ± 5.2^a	26.6 ± 5.0^b
5%J_0%B	0.55 ± 0.10^a	26.8 ± 2.5^b	15.9 ± 2.1^a
2.5%J_0.0625%B	0.87 ± 0.08^c	48.4 ± 3.3	35.1 ± 5.2^c
2.5%J_0.125%B	$0.80 \pm 0.05^b^c$	22.3 ± 2.1^{ab}	21.2 ± 4.0^{ab}
5%J_0.0625%B	0.65 ± 0.13^{ab}	23.1 ± 2.3^{ab}	18.0 ± 1.7^a
5%J_0.125%B	$0.75 \pm 0.15^b^c$	15.3 ± 1.9^a	11.7 ± 2.5^a

Values are the mean $\pm$ SE. The values in columns with the same upper letter indicate they were not different statistically. J=percentage of *Jatropha* protein added; B=percentage of bentonite added to the cast films' production.

Source. Own elaboration.

Barrier properties and swelling of films with *Jatropha* and soy protein nanoreinforced with bentonite

To evaluate the barrier properties, the polymeric film that showed the best mechanical results was selected, which was obtained with 2.5% of the protein isolate and 0.0625% of bentonite nanoreinforcement and

was compared with the film obtained with 2.5% of the isolated protein of *J. curcas* L., without the addition of nanoreinforcement. In general, it was possible to observe that the nanoreinforcement significantly affected ($p < 0.05$) the characteristics of moisture content (%), swelling (%), and permeability; however, in table 2 it can be observed that the addition of nanoclay does not influence the water vapor transfer rate (WVTR).

The results obtained agree with previous studies that demonstrate that the use of bentonite and clay materials increases the tortuosity in the polymer structure, therefore decreasing the speed of the water vapor transfer rate and gas permeation (Liu *et al.*, 2016; Monteiro *et al.*, 2018; Peelman *et al.*, 2013). Likewise, this study showed evidence that the incorporation of bentonite in the

polymeric matrix made it possible to reduce the film's capacity to retain moisture and swell, which in turn is in line with previous studies (Monteiro *et al.*, 2018; Wakai & Almenar, 2015) where the levels of swelling and moisture content were reduced by up to 35% in films obtained from wheat protein isolate reinforced with montmorillonite.

Table 2. Swelling and barrier properties of the *Jatropha* and soy protein films with and without bentonite nanoreinforcement

Sample	Swelling (%)	WVTR	CO ₂ permeability (%)
With bentonite	84.6 ± 2.8	132.8 ± 31.5	0.007 ± 0.0001
Without bentonite	146.5 ± 5.5	178.8 ± 17.5	12.4 ± 0.01

The average of the values accompanied by different letters present significant differences ($p < 0.05$).

Source. Own elaboration.

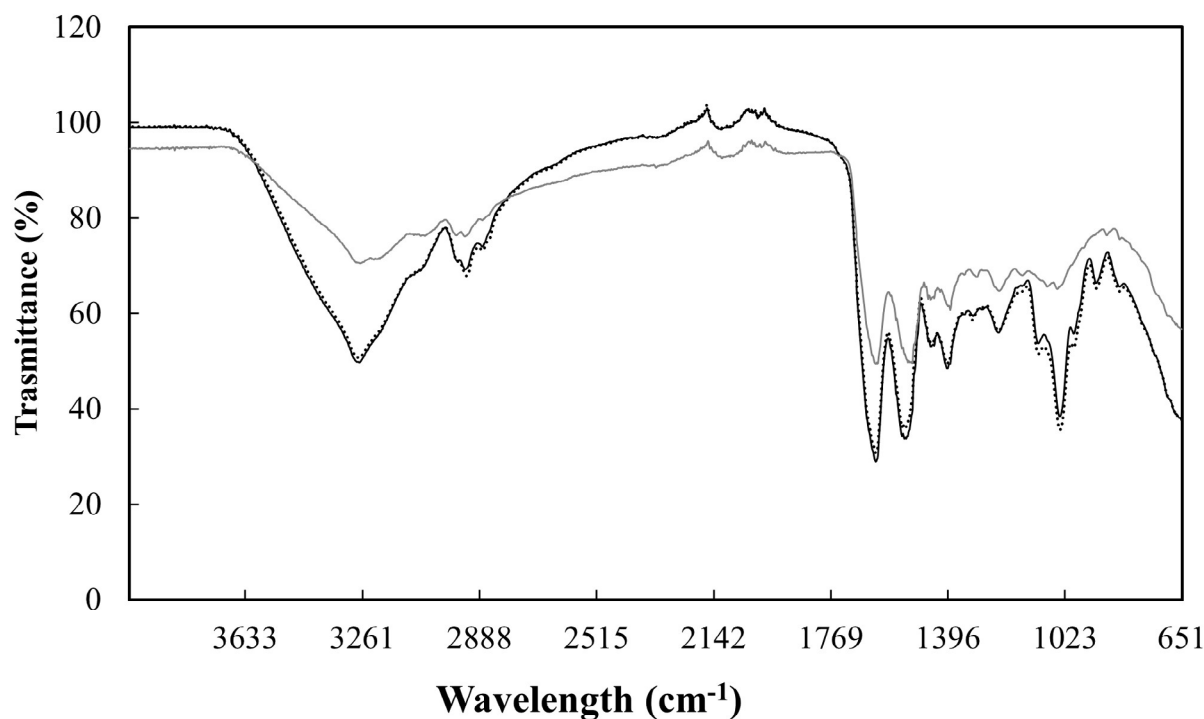
Fourier transformed infrared spectroscopy

The infrared spectra of the films made with and without nanoreinforcement can be observed in Figure 2. The peaks at 3622.4 and 3416.0 cm^{-1} , attributed to vibrations of the hydroxyl group present in the bentonite, cannot be seen in the spectrum (Wang, Zhang, Han, & Bai, 2009); this is because their intensity is too low compared to the values of the O-H and N-H groups (3500 to 3300 cm^{-1}) present in the polymeric films of *Jatropha* and soy proteins, which are capable of forming hydrogen bonds

with the carbonyl groups of peptides present in the proteins (Karnnet, Potiyaraj, & Pimpan, 2005).

The presence of absorption bands can be observed in the range of 800 to 1500 cm^{-1} , related to five peaks corresponding to the vibrations of C-C and C-O present in the glycerol used as a plasticizer in the formation of the films (Guerrero *et al.*, 2010). On the other hand, the peak present in the 1020-995 cm^{-1} interval indicates the presence of the Si-O group of the bentonite nanoreinforcement in the films (Iman & Maji, 2012).

Figure 2. FTIR spectrum of the protein-isolate films with and without bentonite reinforcement



Note. 2.5% jatropha protein (gray line), 2.5% jatropha protein+0.125% bentonite (black line), 5% jatropha protein+0.125% bentonite (dashed line).

Source. Own elaboration.

Conclusions

The incorporation of bentonite nanoreinforcement significantly improved the deformation characteristics of the films made from protein isolates of soy and *Jatropha* cake. The formulation that showed the highest values for mechanical properties was the film obtained with 2.5% *Jatropha* protein isolate, 97.5% soy protein isolate, and 0.0625% bentonite. The interaction of the constituent compounds of the films was verified using infrared spectroscopy. The addition of nanoreinforcement to the film contributed to a significant improvement in barrier characteristics, such as moisture

content (%), swelling (%) and permeability. Although a certain effect on the speed of water vapor transfer was seen, this was not statistically significant with respect to the incorporation of the bentonite nanoreinforcement.

Acknowledgements

Sierra-Sarmiento acknowledges the financial support from UNIAGRARIA. Additionally, the authors acknowledge the Instrumental Analysis Laboratory of the Universidad Nacional de Colombia, Medellín campus, and CENIVAM for the HPLC and FTIR experiments.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abdul-Khalil, H. P. S., Sri-Aprilia, N. A., Bhat, A. H., Jawaid, M., Paridah, M. T., Rudi, D., & ahin-Nadeem, H. (2013). A Jatropa biomass as renewable materials for biocomposites and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 667–685. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.036>
- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis; Association of Oficial Analytical Chemist. Washington, DC.
- ASTM. (2010). Standard Test metohd for tensile properties of thin plastic sheeting.
- Atarés, L., & Chiralt, A. (2016). Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. *Trends in Food Science and Technology*, 48, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.001>
- Chrissafis, K., Antoniadis, G., Paraskevopoulos, K. M., Vassiliou, A., & Bikiaris, D. N. (2007). Comparativestudy of the effect of different nanoparticles on the mechanical properties and thermal degradation mechanism of in situ prepared poly(-caprolactone) nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 67 (10), 2165–2174. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.027>
- Elfadly, A. M., Zeid, I. F., Yehia, F. Z., Abouelela, M. M., & Rabie, A. M. (2017). Production of aromatic hydrocarbons from catalytic pyrolysis of lignin over acid-activated bentonite clay. *Fuel Processing Technology*, 163, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.033>
- Garavand, F., Rouhi, M., Razavi, S. H., Cacciotti, I., & Mohammadi, R. (2017). Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 687–707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.093>
- González, A., Strumia, M. C., & Alvarez Igarzabal, C. I. (2011). Cross-linked soy protein as material for biodegradable films: Synthesis, characterization and biodegradation. *Journal of Food Engineering*, 106(4), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.030>
- Guerrero, P., Retegi, A., Gabilondo, N., & De La Caba, K. (2010). Mechanical and thermal properties of soy protein films processed by casting and compression. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.039>
- Iman, M., & Maji, T. K. (2012). Effect of crosslinker and nanoclay on starch and jute fabric based green nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 89(1), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.03.012>

- Karnnet, S., Potiyaraj, P., & Pimpan, V. (2005). Preparation and properties of biodegradable stearic acid-modified gelatin films. *Polymer Degradation and Stability*, 90(1), 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.016>
- Lambrecht, M. A., Deleu, L. J., Rombouts, I., & Delcour, J. A. (2018). Heat-induced network formation between proteins of different sources in model systems, wheat-based noodles and pound cakes. *Food Hydrocolloids*, 79, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.032>
- Lee, H. G., Kim, G. H., & Ha, C. S. (2017). Polyimide/amine-functionalized cellulose nanocrystal nanocomposite films. *Materials Today Communications*, 13(August), 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.10.010>
- Liu, S., Cai, P., Li, X., Chen, L., Li, L., & Li, B. (2016). Effect of film multi-scale structure on the water vapor permeability in hydroxypropyl starch (HPS)/Na-MMT nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 154, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.006>
- Medina-Jaramillo, C., Ochoa-Yepes, O., Bernal, C., & Famá, L. (2017). Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts. *Carbohydrate Polymers*, 176(August), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.079>
- Monteiro, M. K. S., Oliveira, V. R. L., Santos, F. K. G., Barros Neto, E. L., Leite, R. H. L., Aroucha, E. M. M., Silva, R. R., Silva, K. N. O. (2018). Incorporation of bentonite clay in cassava starch films for the reduction of water vapor permeability. *Food Research International*, 105, 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.030>
- Osorio-Ruiz, A., Solorza-Feria, J., Chiou, B. Sen, Wood, D. F., Williams, T. G., Avena-Bustillos, R. J., & Martínez-Ayala, A. L. (2017). Effect of montmorillonite clay addition on the morphological and physical properties of *Jatropha curcas* L. and *Glycine max* L. protein concentrate films. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(7), 1–11. <https://doi.org/10.1002/app.44459>
- Panseri, S., Martino, P. A., Cagnardi, P., Celano, G., Tedesco, D., Castrica, M., Balzaretto, C., Chiesa, L. M. (2018). Feasibility of biodegradable based packaging used for red meat storage during shelf-life: A pilot study. *Food Chemistry*, 249(August 2017), 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.067>
- Peelman, N., Ragaert, P., De Maulenaer, B., Adons, D., Peeters, R., Cardon, L., Van Impe, F., Devlieghere, F. (2013). Application of bioplastics for food packaging. *Trends in Food Science and Technology*, 32, 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.003>

- Popovi, S., Perić, D., Vaštag, Ž., Lazić, V., & Popović, L. (2012). Pumpkin oil cake protein isolate films as potential gas barrier coating. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.035>
- Rhim, J. W. (2011). Effect of clay contents on mechanical and water vapor barrier properties of agar-based nanocomposite films. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.010>
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bionanocomposites for Food Packaging Applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00018-2>
- Saurabh, C. K., Gupta, S., Bahadur, J., Mazumder, S., Variyar, P. S., & Sharma, A. (2015). Mechanical and barrier properties of guar gum based nano-composite films. *Carbohydrate Polymers*, 124, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.02.004>
- Wakai, M., & Almenar, E. (2015). Effect of the presence of montmorillonite on the solubility of whey protein isolate films in food model systems with different compositions and pH. *Food Hydrocolloids*, 43, 612–621. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.022>
- Wang, N., Zhang, X., Han, N., & Bai, S. (2009). Effect of citric acid and processing on the performance of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 76(1), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.021>
- Wang, W., Zhang, H., Jia, R., Dai, Y., Dong, H., Hou, H., & Guo, Q. (2018). High performance extrusion blown starch/polyvinyl alcohol/clay nanocomposite films. *Food Hydrocolloids*, 79, 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.013>
- Yun, Y. H., Youn, H. G., Shin, J. Y., & Yoon, S. Do. (2017). Preparation of functional chitosan-based nanocomposite films containing ZnS nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 1150–1157. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.2017.32.010>
- Zhou, M., Liu, Q., Wu, S., Gou, Z., Wu, X., & Xu, D. (2016). Starch/chitosan films reinforced with polydopamine modified MMT: Effects of dopamine concentration. *Food Hydrocolloids*, 61, 678–684. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.030>

Radish flour obtained by combined osmotic dehydration and microwave drying: Process optimization and application in cookies

Harina de rábano obtenida mediante deshidratación osmótica combinada con secado por microondas: optimización del proceso y aplicación en galletas

Cifuentes-Cruz, L. M. y Villamil-Galindo, J. E.*

Departamento de Ingeniería de Alimentos, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / Fecha de aceptación: julio de 2020

Abstract

Radish production in Colombia has increased in recent years; however, its use remains limited to fresh consumption, leading to significant postharvest losses. This study evaluated the optimization of radish flour production through combined osmotic dehydration and microwave drying and its application in cookie formulation. Radish slices were osmotically dehydrated using sodium chloride solutions (10, 20, and 30% w/w) and subsequently dried by microwave radiation. Mass transfer kinetics, color changes, and sensory acceptance were analyzed.

The 20% NaCl treatment showed the most balanced performance in terms of moisture reduction, solid gain, and color preservation. Radish flour was incorporated into cookies at substitution levels of 10, 20, and 30%, with the 10% formulation achieving the highest level of sensory acceptance. Shelf-life evaluation demonstrated superior stability in metallized packaging compared to transparent packaging. These results support radish flour as a viable ingredient for sustainable bakery applications.

Keywords: Radish flour, osmotic dehydration, microwave drying, food valorization, bakery products.

* Correspondencia: Villamilg.johan@uniagraria.edu.co

Resumen

La producción de rábano en Colombia ha aumentado en los últimos años; sin embargo, su uso sigue limitado al consumo en fresco, lo que genera pérdidas significativas en poscosecha. Este estudio evaluó la optimización de la producción de harina de rábano mediante la combinación de deshidratación osmótica y secado por microondas, así como su aplicación en la formulación de galletas. Rodajas de rábano fueron sometidas a deshidratación osmótica utilizando soluciones de cloruro de sodio (10, 20 y 30 % p/p) y posteriormente secadas mediante radiación de microondas. Se analizaron las cinéticas de transferencia de masa, los cambios de color y la aceptación sensorial.

El tratamiento con 20 % de NaCl mostró el mejor desempeño equilibrado en términos de reducción de humedad, ganancia de sólidos y preservación del color. La harina de rábano se incorporó en galletas a niveles de sustitución del 10, 20 y 30 %, siendo la formulación con 10 % la que alcanzó el mayor nivel de aceptación sensorial. La evaluación de vida útil demostró una mayor estabilidad en empaques metalizados en comparación con empaques transparentes. Estos resultados respaldan la harina de rábano como un ingrediente viable para aplicaciones sostenibles en panificación.

Palabras clave: harina de rábano, deshidratación osmótica, secado por microondas, valorización de alimentos, productos de panadería.

Introduction

Radish (*Raphanus sativus* L.) is a widely cultivated horticultural crop whose production in Colombia has shown a progressive increase in recent years. Despite its nutritional value and agronomic relevance, radish utilization remains largely limited to fresh consumption, mainly in salads. Commercial standards based on size, shape, and visual appearance result in the rejection of a considerable proportion of harvested roots, which are commonly discarded as waste. This situation contributes to postharvest losses and environmental impacts associated with organic residue disposal, highlighting the need for processing alternatives that enable value addition and resource efficiency (Asohofructol, 2020).

Dehydration is one of the most widely used preservation techniques to extend shelf life and reduce postharvest losses. Osmotic dehydration is a mild process that partially removes water by immersing food in a hypertonic solution, promoting mass transfer while preserving structural and sensory attributes (Rahman, 2003; Azoubel and Murr, 2004). The efficiency of this process depends on factors such as solute type, concentration, temperature, and immersion time (Rastogi *et al.*, 2000). When osmotic dehydration is combined with microwave drying, the overall process time can be significantly reduced, enabling rapid moisture removal with lower energy consumption and minimizing the risk of surface hardening, especially in products requiring the elimination of relatively small amounts of water (Scaman, 2005; Della *et al.*, 2010).

In parallel, the bakery industry in Colombia relies heavily on imported wheat flour, generating economic dependence and motivating the exploration of alternative flours derived from locally available crops. Partial substitution of wheat flour with vegetable-based flours represents a promising strategy to diversify raw materials while improving nutritional profiles and sustainability (FENALCE, 2019). In this context, radish flour obtained from dehydrated radish offers potential applications in baked goods such as cookies. Therefore, this study aimed to optimize osmotic dehydration and microwave drying conditions for radish flour production and to evaluate its technological performance, sensory acceptance, and storage stability when applied as a partial substitute for wheat flour in cookie formulations.

Materials and methods

Fresh radishes were selected, washed, and sliced into discs of 4 mm thickness. Osmotic dehydration was performed by immersing the slices in sodium chloride solutions at concentrations of 10, 20, and 30% (w/w) for 3 h at ambient temperature (20°C).

Mass transfer parameters, including moisture loss, solid gain, and weight reduction, were determined using a completely randomized design. After osmotic treatment, radish slices were dried using a domestic microwave oven (700 W) for 15 min. Color parameters (L^* , a^* , b^*) were measured using a colorimeter, and sensory evaluation of dehydrated radish samples was conducted using a hedonic scale.

The dried radish was milled to obtain flour, which was incorporated into chocolate chip cookies at substitution levels of 10, 20, and 30% (w/w) of wheat flour.

Sensory evaluation of the cookies was carried out to determine consumer acceptance. Shelf-life studies were performed over 28 days at 16, 25, and 37°C using transparent and metallized packaging, assessing moisture content, fracturability, color changes, and sensory attributes.

Results and discussion

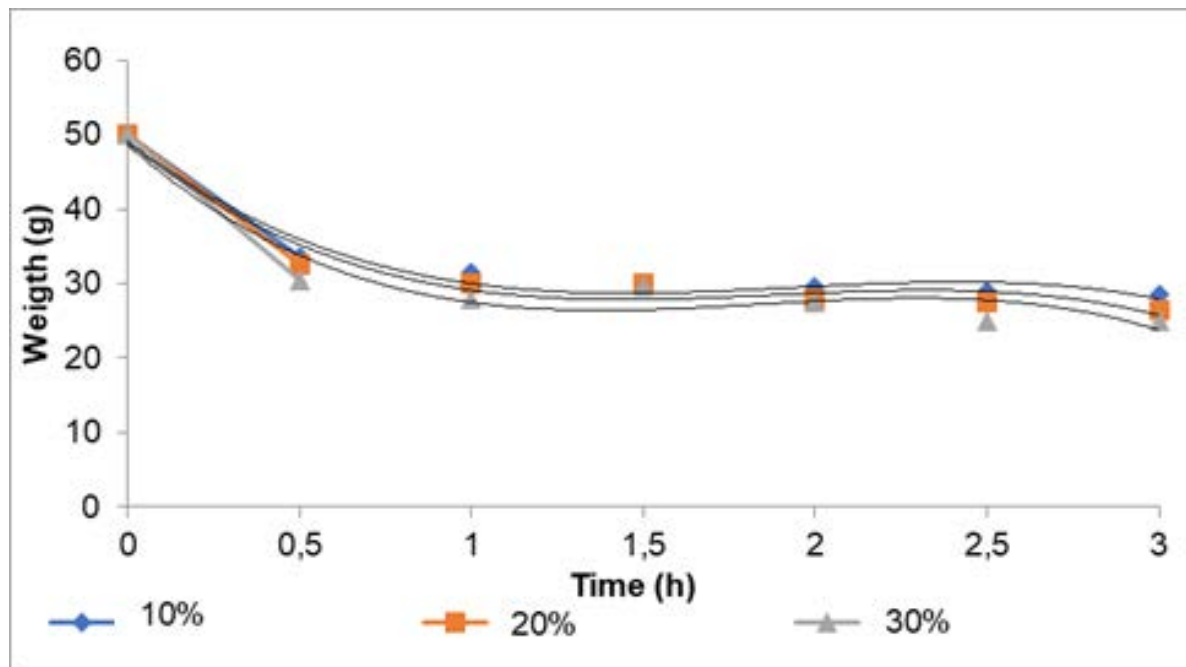
The osmotic dehydration kinetics demonstrated a clear influence of sodium chloride concentration on mass transfer

phenomena. As shown in Figure 1, increasing NaCl concentration promoted higher moisture loss and solid gain during the osmotic process, in agreement with the principles described for hypertonic dehydration systems (Rahman, 2003; Azoubel and Murr, 2004).

However, excessive solute concentration intensified osmotic stress, which negatively affected color attributes, particularly luminosity (L^*).

Among the evaluated treatments, the 20% NaCl solution provided the most balanced performance, achieving efficient water removal while limiting undesirable color degradation, which is a factor strongly associated with consumer perception and acceptance.

Figure 1. Moisture loss vs. time for 10, 20, and 30% NaCl



Source. Own elaboration.

Microwave drying proved to be an effective complementary technique, allowing a rapid reduction of moisture content to values close to 3% for all treatments (Table 1). This result confirms the suitability of microwave technology for products requiring short drying times and low final moisture levels, as previously reported by Scaman (2005). Although samples treated with higher NaCl concentrations exhibited slightly lower residual moisture after microwave drying,

noticeable color deterioration was observed in samples treated with 10% and 30% NaCl. Similar effects have been associated with intensified solute uptake and structural changes caused by osmotic stress, which can exacerbate thermal sensitivity during microwave exposure (Rastogi *et al.*, 2000; Della *et al.*, 2010). These findings further support the selection of intermediate NaCl concentration as the optimal processing condition.

Table 1. Radish moisture content during process

% NaCl	Treatment	% Moisture
0%	Fresh	93.81
10%	Osmotic dehydration	83.3
20%		76.3
30%		70.1
10%	Microwave	3.08
20%		3.01
30%		2.50

Source. Own elaboration.

Regarding product application, cookies formulated with 10% radish flour achieved the highest sensory scores for appearance, flavor, texture, and overall acceptability. Higher substitution levels negatively affected sensory attributes, likely due to increased fiber content and residual salt perception. Shelf-life evaluation showed that cookies packaged in transparent material experienced greater moisture gain, increased fracturability, and more pronounced color changes compared to those stored in metallized packaging (Table 2).

Color stability of cookies containing 10% radish flour was strongly influenced by storage time, temperature, and packaging material over the 28-day evaluation period.

At day 0, cookies exhibited initial CIELAB values of $L^* = 49.17$, $a^* = 7.38$, and $b^* = 20.27$. For samples packaged in transparent material, a progressive reduction in lightness was observed, particularly at elevated temperatures. At 37°C, L^* values decreased from 49.17 to 36.41 after 7 days and remained below 39.0 by day 28, indicating pronounced darkening.

Table 2. Effect of packaging material on the quality attributes of cookies containing 10% radish flour during storage

Packaging material	Moisture change	Fracturability	Color stability (L*, a*, b*)	Sensory acceptance	Overall stability
Transparent	High moisture gain	Significant increase	Noticeable color changes	Decreased over storage	Low
Metallized	Low moisture gain	Minor changes	High color stability	Maintained	High

Source. Own elaboration.

This behavior was accompanied by a reduction in b^* values, from 20.27 to 13.34 at day 28, suggesting loss of yellowness and chromatic instability.

In contrast, cookies stored in metallized packaging showed greater color preservation, with L^* values remaining within the range of 38.0–43.7 throughout storage, even at 25°C and 37°C. Changes in a^* and b^* coordinates were also less pronounced in metallized samples, which maintained b^* values above 16.0 across all storage conditions. These results demonstrate that metallized packaging effectively limited light-induced and moisture-related color degradation.

Considering the combined stability of L^* , a^* , and b^* coordinates, together with supporting moisture, texture, and sensory data, the estimated shelf life of cookies formulated with 10% radish flour was 28 days under ambient storage conditions when metallized packaging was used. In contrast, samples packaged in transparent material exhibited noticeable color deterioration, particularly at higher temperatures, before completing the storage period. This behavior is consistent with the higher light and moisture permeability of transparent materials, which accelerates physicochemical deterioration during storage (Rahman, 2003).

Overall, these results demonstrate that radish flour obtained through optimized osmotic dehydration and microwave drying can be successfully incorporated into bakery products, contributing to raw material diversification and the sustainable valorization of horticultural crops.

Conclusions

Combined osmotic dehydration and microwave drying represent an effective strategy for producing radish flour with suitable physicochemical and sensory characteristics. A sodium chloride concentration of 20% during osmotic dehydration provided the optimal process performance.

Radish flour can successfully replace up to 10% of wheat flour in cookies without compromising consumer acceptance. Metallized packaging is recommended to ensure product stability during storage. This approach contributes to food waste reduction and promotes the valorization of horticultural by-products.

References

- Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 291–295. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00132-8)
- Della, R. F., Serio, A., & de Figueirêdo, R. M. F. (2010). Influence of osmotic dehydration and microwave drying on quality attributes of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Processing*, 88(2–3), 133–141
- ASOHOFRUCOL. (2020). *Plan Hortícola Nacional y diagnóstico del sector hortofrutícola en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- FENALCE. (2019). *Panorama productivo y agroindustrial del sector agrícola colombiano*. Bogotá, Colombia.
- Rahman, M. S. (2003). *Handbook of food preservation*. New York: Marcel Dekker.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjan, K., & Knorr, D. (2000). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 11(2), 48–59.
- Scaman, C. H. (2005). Microwave processing of foods. In D.R. Heldman & D.B. Lund (Eds.), *Handbook of food engineering* (2nd ed., pp. 599–632). Boca Raton: CRC Press.

Implementación de un sistema de riego automatizado para el cultivo de café en la finca Villa de Lobos, San Francisco, Cundinamarca

Implementation of an automated irrigation system for coffee cultivation at Villa de Lobos farm, San Francisco, Cundinamarca

Álvarez, J. M.*, Aponte, J. D. y Quintero, L. D.

Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / Fecha de aceptación: julio de 2020

Resumen

El presente estudio se desarrolló bajo los lineamientos de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia, donde la prioridad es la investigación orientada a crear, desarrollar, sistematizar, aplicar y difundir el conocimiento para el progreso económico y social, con enfoque territorial. Así como la aplicación de tecnologías en el sector agrario que buscan nuevas alternativas para el desarrollo sostenible y el apoyo a los campesinos en sus diversas labores agrícolas.

La investigación se desarrolló en la finca Villa de Lobos, ubicada en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, en la cual se identificó la dificultad de regar las plantas de café en las temporadas de verano, donde el propietario ha realizado riegos manuales durante años y, con el pasar de estos, su salud se ha venido deteriorando.

Bajo este contexto, el hecho de asimilar las necesidades propias de los campesinos, que relacionan sus conocimientos de manera empírica, y al verificar que no existe un control óptimo para el riego de café en dicha región, se desarrolló e implementó un sistema de riego automatizado por aspersión, a través de la medición de temperatura y humedad en el terreno de la siembra, los cuales son procesados por medio de un PLC, encargado de activar el sistema, ya sea de manera manual o automática, según las necesidades propias del usuario.

Para su implementación se utilizó la metodología VDI 2206, como modelo de procedimiento flexible para el diseño de sistemas mecatrónicos. A partir de esta estructura, se logró poner en

* Correspondencia: alvarez.john@uniagraria.edu.co

marcha tecnologías que ofrecen a los agricultores ahorro de tiempo y de agua en temporadas de verano, donde este recurso se hace escaso, mejorando las propiedades físicas de la planta y haciendo que el desarrollo y la producción de estas no se vean atrasados.

Es un proyecto con un costo relativamente bajo con relación a su beneficio, capaz de adaptarse a cualquier tipo de cultivo. Finalmente, arrojó resultados favorables desde el punto de vista técnico, al entregar la cantidad de líquido necesaria para la plantación de café a través de un sistema de riego controlado y preciso. Además, se resalta el hecho de que se lograron estrategias sostenibles que contribuyen al ahorro del recurso hídrico, impactando de manera social y fortaleciendo las técnicas de producción en el sector agrícola.

Palabras clave: riego automatizado, café, agroindustria, PLC, innovación rural.

Abstract

This study was conducted under the guidelines of the Fundación Universitaria Agraria de Colombia, which prioritizes research aimed at creating, developing, systematizing, applying, and disseminating knowledge for economic and social progress with a territorial focus. The project focused on applying technology in the agricultural sector to generate sustainable alternatives and support farmers in their daily activities.

It was carried out at Villa de Lobos Farm, in San Francisco, Cundinamarca, where manual irrigation during dry seasons had become increasingly difficult and detrimental to the farmer's health. In response to this issue and the absence of proper irrigation control for coffee crops in the region, an automated sprinkler irrigation system was developed and implemented. This system uses soil temperature and humidity sensors, whose data are processed by a PLC, which controls irrigation automatically or manually based on the user's needs.

The system was designed using the VDI 2206 methodology, a flexible procedure model for mechatronic system design. This approach enabled the implementation of technologies that save time and water, especially during periods of drought, while improving the physical conditions of the plants and preventing delays in crop development. The project proved to be technically effective and economically feasible, with low implementation costs and adaptability to various crop types.

The system successfully delivered precise water quantities to the coffee plantation and promoted sustainable practices that optimize water use, generate social impact, and enhance agricultural production techniques.

Keywords: Automated irrigation, coffee, agribusiness, PLC, rural innovation.

Introducción

El proyecto se implementó en la finca Villa de Lobos, la cual está ubicada en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, vereda Arrayán Bajo; y se encuentra a una altitud media de 1520 m s. n. m.

Lacabeceramunicipalselocalizaalos4°58'38" de latitud norte y 74°17'32" de longitud oeste.

Cuenta con una temperatura promedio de 21 °C, una velocidad de viento de 0,975 m/s y aproximadamente 12,13 horas de luz al día.

Diseño agronómico

Una vez definida la situación geográfica y topográfica del proyecto, se presenta un listado en la Tabla 1 (NASA, 2022) de sus características más importantes para el diseño del sistema de riego por aspersión.

Tabla 1. Características del sector del cultivo

Característica	Valor
Área cultivada	6390 m ²
Temperatura promedio	21 °C
Humedad relativa mínima	64,81 %
Velocidad del viento	0,975 m/s
Horas de luz	12,13 horas
Tipo de suelo	Franco arenoso
Profundidad de raíces	0.25 m
Eficiencia deseada en riego	80 %

Fuente. Elaboración propia, con base en datos proporcionados por NASA (2022).

Según Rendón Sáenz y Giraldo Herrera (2019), la profundidad de las raíces para el café es de 25 cm. Teniendo esto en cuenta para la caracterización del cultivo y tras seleccionar los datos más críticos, se calcula la evapotranspiración potencial del terreno, utilizando la Ec. (1). Donde f = factor de Blaney-Criddle; p = horas de luz expresadas

en porcentaje anual, de acuerdo con la latitud del lugar; y t = temperatura del lugar.

Reemplazando en la Ec. (1) y teniendo en cuenta que el valor de las horas de luz se halla por la ubicación del sitio en la tabla de Blaney-Criddle, que representa el porcentaje anual de horas luz en el sitio.

$$f = p(0,46 t + 8,13) \quad (1)$$

$$f = 0,27(0,46 (21^\circ) + 8,13) = 5,15 \text{ mm/día} \quad (2)$$

De esta manera, la evapotranspiración corresponde a:

$$ET_o = 3,2 \text{ mm/día} \quad (3)$$

Es decir, el terreno de la finca evapotranspira 3,2 L/m² en una parcela. Para hallar la evapotranspiración total se utiliza la Ec. (4), además de conocer el coeficiente de un cultivo en etapa media, el cual, según la FAO, corresponde a 1,1.

$$ET_c = 3,2 \text{ mm/día} * 1,1 = 3,52 \text{ mm/día} \quad (4)$$

Esto significa que la demanda hídrica del cultivo en la finca es de 3,52 L/m².

A pesar de ello, los parámetros de evapotranspiración cambian con el paso del tiempo, así como las precipitaciones, por lo cual la demanda puede variar y debe ser ajustada periódicamente.

Con el fin de determinar sus capacidades retentivas de agua, se debe identificar el tipo de suelo. Para ello, se extrajo una muestra para observar y conocer su composición. De esta manera, se define de forma intuitiva el tipo de suelo.

Tabla 2. Características del tipo de suelo franco-arenoso

Característica	Valor
Capacidad de campo	16 %
Punto de marchitez	7 %
Humedad disponible	9 %
Densidad aparente	1,50 g/cm ³
Velocidad de infiltración	20 mm/h

Fuente. Elaboración propia, con base en datos proporcionados por la FAO (2005).

Su textura se percibe áspera al tacto, con terrones fácilmente rompibles, por lo que se puede afirmar que se trata de un suelo arenoso. Al ser un terreno con una alta productividad agrícola y superficial, se puede decir que es franco, por lo cual su denominación sería del tipo franco-arenoso (FAO, 1999).

Las características principales de este tipo de terreno se detallan en la Tabla 2.

Con los valores de las características principales del terreno para la retención de agua, se procede a resolver la Ec. (5) para determinar la lámina disponible en el terreno.

$$L_d = H_d * \rho_a * Pr \quad (5)$$

Donde H_d = Capacidad de campo – punto de marchitez; ρ_a = densidad aparente; Pr = profundidad de raíces del cultivo; y $L_d = 0,09 * 150 \text{ g/cm}^3 * 25 \text{ cm} = 3,375 \text{ cm} = 33,75 \text{ mm}$.

Esto quiere decir que el suelo tiene una capacidad de almacenamiento de 33,75 L/m². Ahora bien, si se relaciona con la necesidad hídrica del cultivo, se establece que el intervalo de riego, a partir de la Ec. (6).

$$I_r = \frac{L_d}{ET_c} \quad (6)$$

Donde L_d = lámina disponible y ET_c = evotranspiración del cultivo.

$$I_r = \frac{33,75 \text{ mm}}{3,52 \text{ mm/día}} = 9,5 \text{ días} \quad (7)$$

De acuerdo con la anterior información, se observa que es necesario realizar riego cada 9 días, asegurando el abastecimiento de agua durante este periodo.

$$L_r = 3,2 \frac{\text{mm}}{\text{día}} * 9 \text{ día} = 31,68 \text{ mm} \quad (8)$$

Esto significa que, durante este tiempo, el cultivo consumirá 31,68 L/m². Dicho valor se encuentra por debajo de la capacidad de retención de agua del terreno, lo que indica que el intervalo de riego es suficiente.

Tabla 3. Características aspersor círculo parcial plástico

Característica	Valor
Referencia	Aspersor círculo parcial de 1/2"
Presión de trabajo	15 m.c.a
Caudal	0,13 L/s
Diámetro de mojado	12 m

Fuente. Elaboración propia, con base en datos proporcionados por Agrofer (2022).

Para conocer cuánta lámina de agua se riega, es necesario conocer las características del aspersor, detalladas en la Tabla 3.

$$0,13 \text{ lt/s} = 468 \text{ lt/h}$$

$$L_{asp} = \frac{468 \text{ lt/h}}{12\text{m} * 12\text{m}} = 3,25 \text{ mm/h} \quad (10)$$

Con base en dicha información, se calcula la lámina brindada, utilizando la Ec. (9). Debido a que el diámetro de mojado es de 12 m, se deja un espacio cuadrado entre aspersores, quedando a una distancia de 12 m entre aspersores en el mismo lateral y un espacio del mismo valor entre cada lateral.

Esto significa que cada aspersor brindará una lámina de 3,25 L/m² en una hora. Conociendo este dato, se procede a determinar el tiempo que debe durar el riego para completar la lámina necesaria para satisfacer el cultivo, utilizando la Ec. (11)

$$L_{asp} = \frac{Q_{asp}}{D_{aspersores} * D_{entre laterales}} \quad (9)$$

Donde Q_{asp} = caudal emitido por el aspersor; $D_{aspersores}$ = distancia entre aspersores; y $D_{entre laterales}$ = distancia entre laterales.

$$T_r = \frac{L_d}{L_{asp} * \eta_{riego}} \quad (11)$$

Donde L_d = lámina disponible; L_{asp} = lámina de aspersor; y η_{riego} = eficiencia esperada de riego

$$T_r = \frac{31,68 \text{ mm}}{3,25 \text{ mm/h} * 0,8} = 12,18 \text{ horas} \quad (12)$$

Con una eficiencia esperada del 80 %, el aspersor deberá regar 12,18 horas para completar la lámina requerida. Las horas disponibles para riego se establecieron en 20 horas al día, de tal manera que se puede realizar un turno de riego por día. Por lo tanto, el número total de turnos que se realizarán en el intervalo de tiempo es de 9 turnos. Mientras que el área de riego corresponde a 710 m² por día, completando el riego total en nueve días.

Por las condiciones del terreno, se decidió dividir el área en siete laterales, regando durante siete días. Entre tanto, el intervalo de cada línea de riego es de 9 días, y el área por turno pasa a ser igual a 912,85 m².

El almacenamiento del agua utilizada para el riego se encuentra a 61,96 m del sistema de riego. Entre tanto, el reservorio tiene una capacidad de almacenamiento de 30 m³, es decir, 30 000 L. El reservorio se llena en un tiempo de 18 horas, lo que corresponde a una razón de 1667 L/h.

Esto indica que el tanque estará lleno al día siguiente, lo cual no será un problema para cumplir con la demanda hídrica del cultivo, además de que el caudal por línea se describe en la Ec. (13).

$$Q_{\text{línea}} = 5 * 468 \frac{\text{lt}}{\text{hr}} = 2340 \frac{\text{lt}}{\text{hr}} \quad (13)$$

Donde cantidad de aspersores por línea = 5 y caudal del aspersor = 468 L/h.

Según el tiempo de riego necesario, el total de agua que se gastará por día es de 28 050 L/día. Esto significa que la capacidad del tanque satisface esta demanda. Con base en esta información, se calcula la velocidad en la tubería, así como la mayor pérdida que se puede obtener en todo el sistema de tuberías, la cual es de 98,61 m.c.a. Finalmente, se calculan las pérdidas totales del sistema, incluyendo las presiones de los aspersores y el desnivel del terreno, a partir de la Ec. (14).

$$H_{\text{total}} = 98,61 \text{ m. c. a} + 15 \text{ m. c. a} - 18 \text{ m} = 95,96 \text{ m. c. a} \quad (14)$$

Diseño eléctrico

Una vez definido el sistema hidráulico, se determina el sistema eléctrico. Es importante resaltar que en la vereda se cuenta con energía monofásica; por lo tanto, solo se pueden elegir motobombas con voltaje de 110 V y una potencia hasta 2 HP. Teniendo en cuenta las pérdidas totales, se optó por utilizar una motobomba centrífuga JS2-2MW.

Con base en lo anterior, se diseña el esquema de potencia para el accionamiento del motor, seleccionando un cable de calibre AWG #8, el cual es óptimo para soportar hasta 32 A y evitar que ocurran recalentamientos y posibles incendios. La fase y el neutro llegan directamente al guardamotor; después, la línea atraviesa el contactor, que es accionado directamente por el PLC.

Como parte de la protección del sistema, se cuenta con un interruptor de flotador, el cual desactiva la señal eléctrica cuando el tanque está vacío.

Para conocer la condición del terreno, se empleó un controlador MT30, el cual cuenta con tres salidas tipo contacto, capaces de cerrarse cuando los valores de humedad se encuentran por debajo del 70 %, ya que, según Rendón Sáenz y Giraldo Herrera (2019), esta debe ser la humedad óptima para el crecimiento del café.

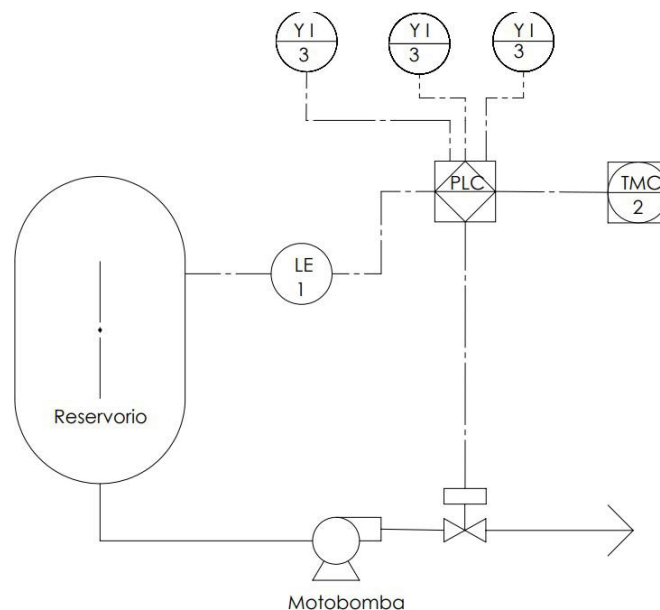
El PLC recibe su alimentación por medio de una fuente de poder de 24 VDC, al igual que el controlador MT-530E. Por lo tanto, se conecta un disyuntor bipolar para proteger el controlador contra cortocircuitos y sobrevoltajes. En sus entradas recibe la señal de 24 VDC proveniente del flotador. Mientras que el contacto normalmente cerrado del relé térmico se conectó en serie con el botón “paro de emergencia”, para detener su funcionamiento en caso de fallas en la tubería o en el sistema. La primera posición es en modo manual, que activa el sistema de riego sin importar la humedad ni la situación horaria.

El segundo selector se denomina automático, que activa el sistema teniendo en cuenta el sensor de humedad y el horario actual. Las salidas activan el contactor de la motobomba, la electroválvula que habilita el paso de fluido y los indicadores de arranque y paro.

Una vez dadas las condiciones para el funcionamiento y el accionamiento por el selector, se activará un retardo a la conexión de 5 s.

Esto permitirá que la electroválvula se active al instante y la motobomba lo haga después de 5 s. En paralelo, se conecta una señal normalmente cerrada que indica el estado inicial del sistema en paro; esta condición solo se ve interrumpida por la señal abierta del paro de emergencia. En caso de que el relé térmico active su contacto, se encenderá un piloto indicador de falla. En la Figura 1 se detalla el diagrama de tuberías e instrumentación correspondiente.

Figura 1. Diagrama P&ID del sistema



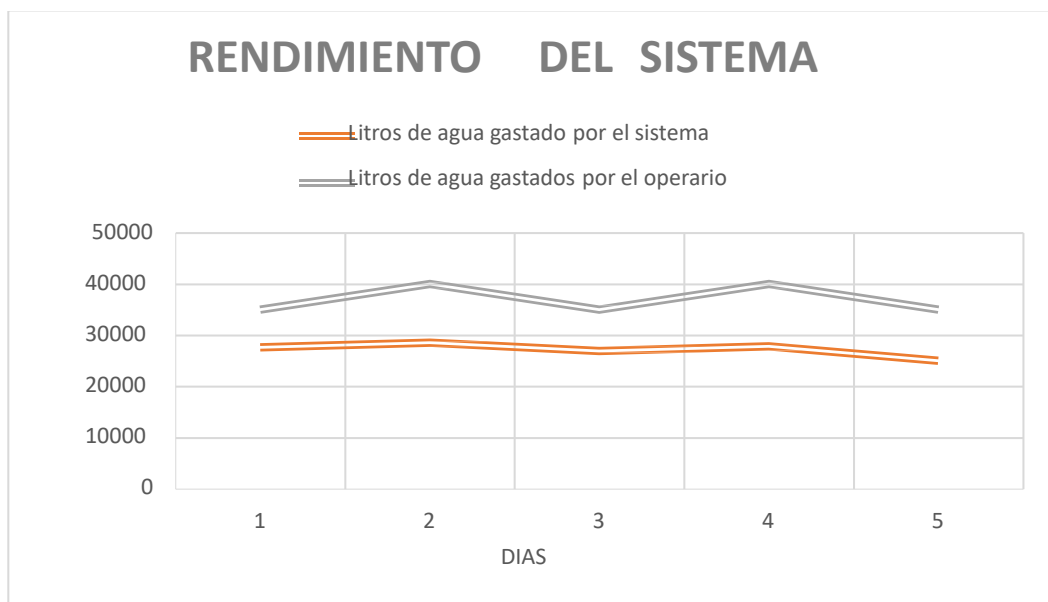
Fuente. Elaboración propia.

Resultados

El sistema se puso a prueba durante 5 días, realizando el riego en modo automático, y se comparó con el método que se realizaba previamente, consistente en llenar manualmente un tanque de 5000 L.

Se realizó el riego en los extremos del terreno, en un área de 710 m², dando como resultado la Figura 2. Para tomar las mediciones del operario, se verificó el número de veces en que llenó el tanque de 5000 L al regar la superficie establecida, mientras que la cantidad de agua utilizada por el sistema se midió con base en la profundidad restante en el reservorio.

Figura 2. Rendimiento del sistema



Fuente. Elaboración propia.

Se logró evidenciar que el operario gastó 37 000 L, mientras que, al hacer uso del sistema de riego automático, se utilizaron 27 160 L, lo que indica una diferencia de 9840 L, evidenciando un ahorro de agua del 36 %, aproximadamente.

Conclusiones

La implementación del sistema de riego por aspersión automatizado en la finca Villa de Lobos demostró un impacto significativo

tanto en la optimización del recurso hídrico como en la mejora de las condiciones de trabajo del agricultor. El sistema permitió reducir en aproximadamente un 36 % el consumo de agua frente al método manual, lo cual se traduce en una mayor sostenibilidad operativa, especialmente en épocas de escasez.

Además del ahorro de agua, se logró mejorar la eficiencia del riego, cubriendo un mayor número de plantas en menor tiempo. Este resultado se debe a la automatización basada

en sensores de humedad y temperatura, lo cual permitió una gestión más precisa del recurso, evitando excesos de riego que puedan afectar el cultivo. El sistema integra un tablero de control en tiempo real, facilitando el monitoreo y la toma de decisiones por parte del productor sin necesidad de intervención constante.

Desde el punto de vista técnico y económico, el sistema demostró ser funcional, escalable y de bajo costo relativo en comparación con su beneficio, lo que lo convierte en una solución viable para otros productores en condiciones similares. Por tanto, los resultados obtenidos en la finca Villa de Lobos abren un panorama favorable para replicar esta tecnología en otras zonas del municipio de San Francisco y de la provincia del Gualivá, fortaleciendo las capacidades productivas locales mediante el uso de tecnologías apropiadas y sostenibles.

Este proyecto no solo evidencia el potencial de la ingeniería mecatrónica aplicada al agro, sino que también refleja el compromiso con el desarrollo rural, la transferencia tecnológica y el mejoramiento de las condiciones de vida del pequeño productor campesino.

Referencias

- Agrofer. (2022). *Aspersor Plástico Sectorizado 1/2"*. AGROFER AL S.A.S. <https://Repositoriotec.Tec.Ac.Cr/Handle/2238/9879>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1999). *Educación Ambiental para el Trópico de Cochabamba*. FAO. <https://www.fao.org/3/Ah645s/AH645Soo.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. *Boletín de Suelos de la FAO*, 79, 1-113.
- NASA. (2022). *Power Data Access Viewer*. Nasa. <https://Power.Larc.Nasa.Gov/Data-Access-Viewer/>
- Rendón Sáenz, J. y Giraldo Herrera, A. (2019). Distribución de raíces en café variedad Castillo bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé*, 70(1), 7-17. <https://orcid.org/0000-0002-5676-4670>

Tendencias actuales en la producción de bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales: una oportunidad para la agroindustria en Colombia

Current trends in biojet fuel production from agro-industrial by-products: An opportunity for the agroindustry in Colombia

Tovar-Díaz, L. A.¹, Gómez-Ángel, K. L.² y Hoyos-Leyva, J. D.^{2*}

¹ Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora, México.

² Grupo de Investigación en Ingeniería Agroindustrial (GINNA), Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / **Fecha de aceptación:** julio de 2020

Resumen

Este artículo analiza las tendencias globales en la producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF) o bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales, con énfasis en su potencial de implementación en Colombia. Se evalúan las principales rutas tecnológicas, incluyendo las tecnologías HEFA, Fischer-Tropsch, Alcohol-to-Jet, Direct Sugar-to-Hydrocarbon y licuefacción hidrotérmica, considerando su madurez tecnológica, eficiencia y viabilidad económica. Asimismo, se examina la disponibilidad de materias primas como residuos lignocelulósicos, aceites residuales y subproductos agroindustriales, destacando su papel en los esquemas de biorrefinería y en la economía circular. El estudio identifica barreras críticas relacionadas con los costos, la logística, la escalabilidad y los marcos regulatorios, que limitan la adopción a gran escala. Se concluye que Colombia posee ventajas competitivas para el desarrollo de SAF, aunque requiere políticas integrales e innovación tecnológica para consolidar una industria sostenible de combustibles de aviación. Además, se discute la interacción entre la disponibilidad de biomasa, los costos de hidrógeno y el desempeño catalítico como determinantes clave de la competitividad y la reducción de emisiones.

Palabras clave: bioturbosina, combustibles sostenibles de aviación, biorrefinería, residuos agroindustriales.

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

Abstract

This article analyzes global trends in the production of sustainable aviation fuels (SAF) from agro-industrial by-products, with an emphasis on their implementation potential in Colombia. The main technological pathways, including HEFA, Fischer–Tropsch, Alcohol-to-Jet, Direct Sugar-to-Hydrocarbon, and hydrothermal liquefaction, are evaluated in terms of their technological maturity, efficiency, and economic feasibility. The availability of feedstocks such as lignocellulosic residues, waste oils, and agro-industrial by-products is examined, highlighting their role in biorefinery schemes and circular economy strategies. Critical barriers related to costs, logistics, scalability, and regulatory frameworks are identified as key constraints for large-scale deployment. The study concludes that Colombia holds significant competitive advantages for SAF development; however, integrated policies and technological innovation are required to establish a sustainable aviation fuel industry. Additionally, the interplay between biomass availability, hydrogen costs, and catalytic performance is discussed as a key determinant of competitiveness and emissions reduction.

Keywords: Biojet fuel, sustainable aviation fuels, biorefinery, agro-industrial residues.

Introducción

El incremento en la demanda global de combustibles sostenibles y la necesidad de reducir las emisiones contaminantes han impulsado la investigación y el desarrollo de biocombustibles avanzados, particularmente de la bioturbosina o los *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) (Zhang *et al.*, 2020). Este tipo de combustible, derivado de recursos renovables, representa una alternativa prometedora al Jet-A convencional, mitigando el impacto ecológico de la aviación al reducir su dependencia de los combustibles fósiles (Kandaramath Hari *et al.*, 2015). En este contexto, la producción de bioturbosina a partir de biomasa es una estrategia clave para el desarrollo sostenible del sector de la aviación (Prussi *et al.*, 2019). La descarbonización del sector aeronáutico mediante el uso de SAF es fundamental para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero sin requerir modificaciones sustanciales en la infraestructura o en las aeronaves existentes (Scheelhaase *et al.*, 2019). De hecho, la integración de biocombustibles y combustibles sintéticos en las mezclas de combustible de aviación es una estrategia vital para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector aeronáutico (O'Connell *et al.*, 2019).

A nivel global, la industria se ha enfocado en diversas tecnologías para la producción de bioturbosina, siendo las rutas de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados y la síntesis de Fischer-Tropsch las más avanzadas y comercialmente viables (Díaz-Pérez y Serrano-Ruiz, 2020; Vásquez *et al.*, 2017). A pesar de su madurez tecnológica,

estas vías presentan desafíos significativos, como los altos costos de producción, que superan en al menos un 120 % los del combustible fósil para aviación, y la limitada disponibilidad de incentivos monetarios para los productores (Mawhood *et al.*, 2016). Esta situación, sumada a la complejidad de los procedimientos administrativos y la rigurosidad de los ensayos de vuelo requeridos para la certificación de nuevas rutas de combustible renovable, ralentiza la adopción masiva de la bioturbosina (Kim *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2017). A pesar de estos desafíos, la demanda de combustibles de aviación sostenibles está en aumento, impulsada por la necesidad de reducir la huella de carbono de la aviación (Kousoulidou y Lonza, 2016; O'Connell *et al.*, 2019).

Esta revisión se centrará en las tendencias de investigación y producción de bioturbosina a nivel global entre 2015 y 2020, con énfasis en el aprovechamiento de subproductos agroindustriales y con un foco en el potencial de producción en Colombia, examinando las vías tecnológicas, la viabilidad económica y los impactos ambientales asociados. Se realizará una revisión sistemática para evaluar los avances y desafíos específicos que enfrenta Colombia en la implementación de estas tecnologías, considerando la disponibilidad de materias primas y el marco regulatorio vigente.

SAF en el mundo

Entre 2015 y 2020 se han consolidado varias rutas tecnológicas para la producción de SAF, basadas principalmente en procesos termoquímicos y bioquímicos de conversión de biomasa.

Tendencias tecnológicas y de producción

El desarrollo de combustibles sostenibles de aviación (SAF, por sus siglas en inglés) se basa en diversas rutas tecnológicas que permiten transformar biomasa o residuos orgánicos en hidrocarburos compatibles con los combustibles convencionales utilizados en la aviación. Estas tecnologías han sido evaluadas y certificadas bajo estándares internacionales como los establecidos por ASTM International, para garantizar su seguridad, desempeño y compatibilidad con la infraestructura existente de combustibles aeronáuticos. Entre las principales rutas tecnológicas destacan HEFA, Fischer-Tropsch, Alcohol-to-Jet, Direct Sugar to Hydrocarbon y Hydrothermal Liquefaction.

A continuación, se presenta una descripción de cada una de las tecnologías de producción empleadas en la obtención de bioturbosina.

HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*)

La ruta tecnológica conocida como HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) es una de las más desarrolladas a nivel comercial para la producción de combustibles sostenibles de aviación. Este proceso utiliza como materia prima aceites vegetales, grasas animales o aceites residuales provenientes de la industria alimentaria (Doliente *et al.*, 2020; Starck *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2019). Durante el proceso, los lípidos son sometidos a reacciones catalíticas en presencia de hidrógeno, incluyendo hidrogenación, hidroisomerización e hidrocrackeo. Estas etapas permiten eliminar el oxígeno presente en los ácidos

grasos y transformar las cadenas carbonadas en hidrocarburos parafínicos de cadena larga, que presentan propiedades fisicoquímicas similares al queroseno de aviación convencional (Pattanaik y Misra, 2017).

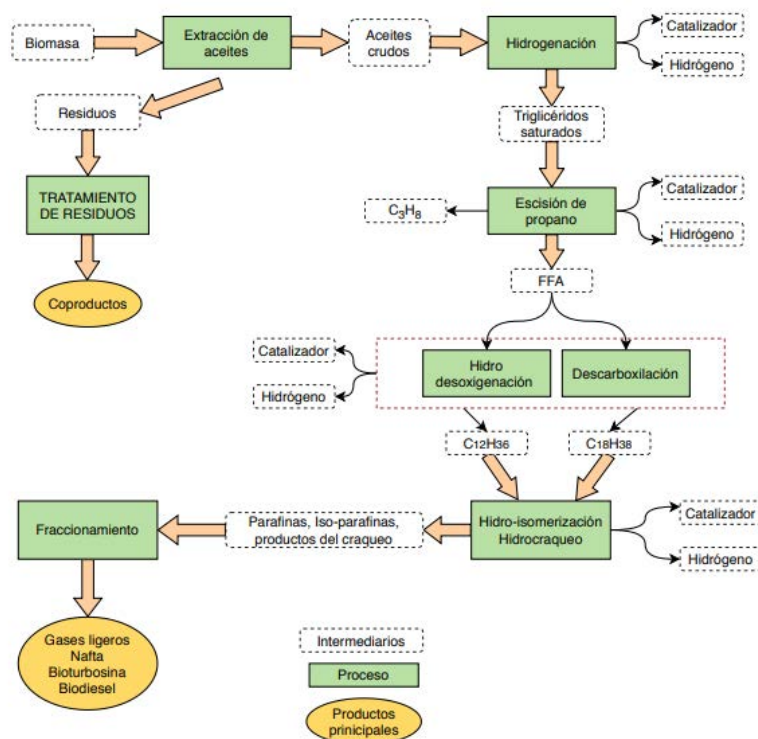
El combustible resultante, conocido como HEFA-SPK (*Synthetic Paraffinic Kerosene*), posee alta estabilidad térmica, bajo contenido de azufre y excelentes características de combustión (Starik *et al.*, 2018). Debido a estas propiedades, esta tecnología ha sido ampliamente adoptada por refinerías que han adaptado sus unidades de hidrotratamiento existentes para producir biocombustibles avanzados. La madurez tecnológica de esta ruta ha permitido su certificación para mezclas de hasta un 50 % con combustible Jet A-1, bajo los estándares internacionales de calidad definidos por ASTM International (Neuling y Kaltschmitt, 2015). Sin embargo, la disponibilidad sostenible de materias primas lipídicas continúa siendo uno de los principales desafíos para su expansión a gran escala.

En la Figura 1 se presenta un diagrama de proceso de la producción de bioturbosina mediante la metodología HEFA, cuando se tienen materias primas compuestas en mayor proporción por lípidos.

FT (*Fischer-Tropsch*)

La síntesis Fischer-Tropsch representa una de las rutas termoquímicas más prometedoras para la producción de combustibles sostenibles de aviación a partir de biomasa lignocelulósica y residuos sólidos. Este proceso implica, inicialmente, la gasificación de biomasa a altas temperaturas

Figura 1. Diagrama de proceso para la producción de bioturbosina mediante hidrotratamiento



Fuente. Elaboración propia.

para producir gas de síntesis, una mezcla compuesta principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. Posteriormente, este gas se somete a reacciones catalíticas que permiten sintetizar hidrocarburos líquidos mediante la polimerización controlada de las moléculas de carbono e hidrógeno (Chiodini *et al.*, 2017; Rauch *et al.*, 2014).

Una de las principales ventajas de esta tecnología radica en su flexibilidad respecto al tipo de biomasa que puede utilizarse como materia prima, incluyendo residuos agrícolas, forestales y desechos sólidos orgánicos (Benedetti *et al.*, 2020). El producto obtenido, denominado FT-SPK, consiste en hidrocarburos parafínicos de alta pureza que pueden ser refinados para producir fracciones compatibles con combustibles

de aviación (Shafer *et al.*, 2019). Esta ruta ha sido certificada para mezclas de hasta un 50 % con combustibles convencionales y ha sido implementada en varios proyectos piloto y plantas demostrativas en diferentes regiones del mundo.

No obstante, la implementación industrial de la tecnología Fischer-Tropsch requiere inversiones de capital significativamente elevadas debido a la complejidad de las etapas de gasificación, limpieza del gas de síntesis y síntesis catalítica (Rafati *et al.*, 2017). A pesar de estos desafíos económicos, su capacidad para utilizar residuos lignocelulósicos de bajo costo como materia prima en este proceso la convierte en una alternativa estratégica para países con alta disponibilidad de biomasa.

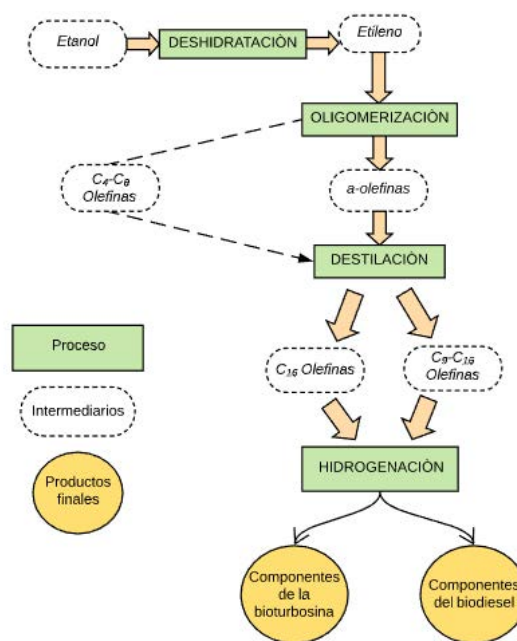
ATJ (Alcohol-to-Jet)

La tecnología Alcohol-to-Jet (ATJ) se basa en la conversión de alcoholes, principalmente etanol o butanol, en hidrocarburos líquidos de rango jet (Geleynse *et al.*, 2018). Estos alcoholes se obtienen generalmente mediante procesos de fermentación de azúcares provenientes de cultivos energéticos o residuos agrícolas ricos en carbohidratos. Una vez producido el alcohol, este es sometido a una serie de transformaciones catalíticas que incluyen la deshidratación para producir olefinas, la oligomerización para aumentar la longitud de las cadenas carbonadas y, posteriormente, la hidrogenación para generar hidrocarburos saturados compatibles con combustibles aeronáuticos (Zacharopoulou y Lemonidou, 2018).

Esta ruta tecnológica resulta de interés para países que cuentan con una infraestructura consolidada para la producción de bioetanol, ya que permite integrar cadenas de valor existentes en el sector de biocombustibles. Además, ofrece la posibilidad de utilizar materias primas lignocelulósicas o residuos agroindustriales mediante procesos avanzados de fermentación. El combustible producido mediante esta tecnología, denominado ATJ-SPK, ha sido certificado para mezclas limitadas con combustible convencional, lo que demuestra su viabilidad técnica. Sin embargo, aún se requieren mejoras en la eficiencia energética y la reducción de costos para lograr su competitividad a gran escala (Vozka *et al.*, 2019).

En la Figura 2 se presentan las principales etapas del proceso “alcohol a turbosina” empleando etanol como intermediario.

Figura 2. Diagrama de proceso para la producción de bioturbosina a partir de etanol



Fuente. Elaboración propia.

DSHC (Direct Sugar to Hydrocarbons)

La ruta *Direct Sugar to Hydrocarbon* (DSHC) representa un enfoque biotecnológico avanzado para la producción de combustibles sostenibles de aviación (Kandaramath Hari et al., 2015). En este proceso, los azúcares derivados de biomasa se convierten directamente en hidrocarburos mediante fermentación microbiana utilizando microorganismos genéticamente modificados (Junne y Kabisch, 2017).

Estos microorganismos han sido diseñados para sintetizar moléculas de hidrocarburos que, posteriormente, pueden ser refinadas y adaptadas para su uso como combustibles de aviación (Jiménez-Díaz et al., 2017).

El atractivo principal de esta tecnología radica en su capacidad para producir hidrocarburos de manera directa, sin requerir múltiples etapas de conversión termoquímica. Además, permite diseñar rutas metabólicas específicas para generar moléculas con propiedades similares a las del queroseno de aviación.

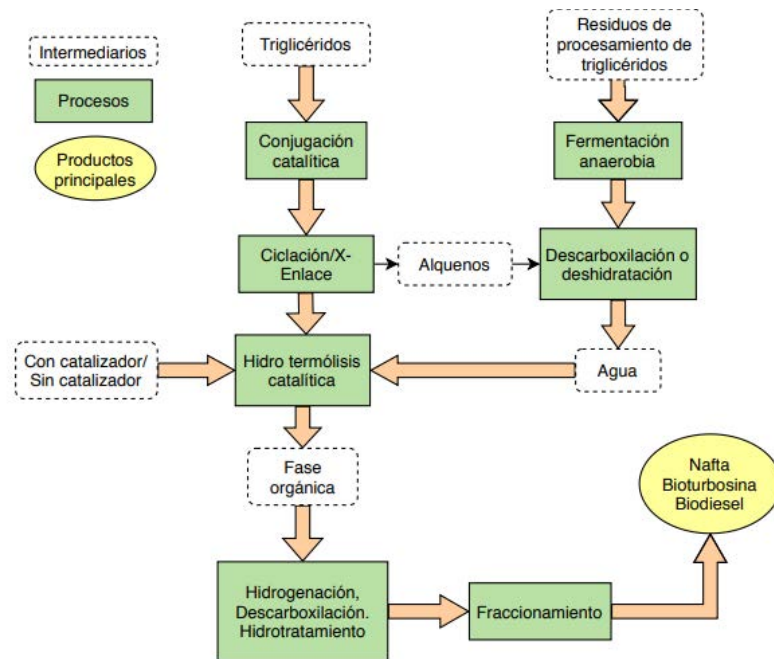
Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo y enfrenta desafíos relacionados con la estabilidad de los microorganismos, los rendimientos de producción y la escalabilidad industrial de los procesos biotecnológicos.

HTL (Hydrothermal Liquefaction)

La licuefacción hidrotérmica (HTL) es un proceso termoquímico que permite convertir biomasa húmeda en un biocrudo energético mediante condiciones de alta presión y temperatura en presencia de agua (Chand et al., 2019). A diferencia de otras tecnologías que requieren el secado previo de la biomasa, la HTL puede procesar materiales con alto contenido de humedad, como residuos orgánicos, lodos de tratamiento de aguas residuales o biomasa acuática (Dimitriadis y Bezergianni, 2017). Durante el proceso, la biomasa se descompone en un líquido orgánico conocido como biocrudo, el cual puede ser posteriormente sometido a procesos de hidrotratamiento para producir combustibles líquidos compatibles con el queroseno de aviación. Esta tecnología presenta ventajas significativas en términos de eficiencia energética y versatilidad de materias primas. No obstante, su desarrollo industrial aún se encuentra en fase de demostración, y se requieren avances tecnológicos adicionales para optimizar la estabilidad del biocrudo y reducir los costos de procesamiento.

Materias primas usadas en el mundo para la producción de SAF

En la Tabla 1 se presenta una comparación entre el rendimiento y el costo mínimo de venta de la bioturbosina obtenida a partir de diferentes materias primas.

Figura 3. Diagrama de proceso para la producción de bioturbosina mediante el método de hidrotermólisis

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 1. Comparación de rendimiento y del costo de venta de referencia de la bioturbosina elaborada a partir de diferentes materias primas, utilizando tecnologías disponibles

Materia prima	Proceso	Rendimiento	Costo de venta mínimo (MJSP)	Referencia
Aceite de camelina	HEFA	~48 % – 49 % (kg fuel/kg oil)	1,63 – 4,62 USD/gal	(Diederichs <i>et al.</i> , 2016; Mupondwa <i>et al.</i> , 2016)
Aceite de soja	HEFA	Variable	3,82 – 4,39 USD/gal	(Pearlson <i>et al.</i> , 2013)
Aceites usados	HEFA	480 kg/MT aceite	2,36 – 4,73 USD/gal	(Pearlson <i>et al.</i> , 2013; Wang, 2016)
Biomasa	Fischer-Tropsch (FT)	~0,17 kg fuel/kg biomasa	6,23 – 7,57 USD/gal	(Diederichs <i>et al.</i> , 2016)
Caña de azúcar	ATJ	Variable	3,65 – 8,08 USD/gal	(Atsonios <i>et al.</i> , 2015)
Biomasa	ATJ (Vía Etanol)	0,11 – 0,14 kg fuel/kg biomasa	4,32 – 10,91 USD/gal	(Crawford <i>et al.</i> , 2016)
Microalgas	HEFA	Variable	31,98 USD/gal	(Klein-Marcuschamer <i>et al.</i> , 2013)

Caña de azúcar	DSHC	~12,1 % (w/w fuel/ biomasa)*	7,17 USD/gal	(Michailos, 2018)
Biomasa	HTL	27,6 % (líquido orgánico)	2,99 – 4,12 USD/gal (estimado)	(Tzanetis <i>et al.</i> , 2017)
Residuos forestales/ agrícolas	Pirólisis+ Hidrogenación	~80,4 % (selectividad aromáticos)	5,23 – 7,15 USD/gal	(Y. Zhang <i>et al.</i> , 2015)

Nota. HEFA: Ésteres y ácidos grasos hidroprocesados; ATJ: alcohol a bioturbosina; FT: Fischer-Tropsch; HTL: hidrotermólisis.

Fuente. Elaboración propia.

El análisis comparativo de las rutas tecnológicas y las materias primas presentadas en la Tabla 1 pone en evidencia que la viabilidad de los combustibles sostenibles de aviación está determinada por la interacción entre tres factores fundamentales: la madurez tecnológica de los procesos de conversión, la disponibilidad sostenible de materias primas y la competitividad económica frente a los combustibles fósiles. En este contexto, la ruta basada en ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA) se ha consolidado como la tecnología más avanzada desde el punto de vista comercial, respaldada por su compatibilidad con la infraestructura existente de refinación y por su relativa simplicidad de integración en las cadenas actuales de producción de combustibles.

Los análisis tecnoeconómicos disponibles indican que la ruta HEFA presenta actualmente los valores más competitivos de precio mínimo de venta del combustible para aviones, *Minimum Jet Fuel Selling Price* (MJSP), entre las diferentes rutas tecnológicas. En particular, materias primas, como el aceite de camelina y los aceites de cocina usados, muestran rangos estimados

de costo entre 1,63 y 4,62 USD por galón y 2,36 y 4,73 USD por galón, respectivamente. Estos resultados reflejan el grado de optimización alcanzado por los procesos de hidrotreatment catalítico, así como la posibilidad de aprovechar unidades industriales ya existentes en refinerías convencionales.

No obstante, la sostenibilidad económica de esta ruta tecnológica depende de manera crítica del costo de las materias primas lipídicas. Diversos estudios coinciden en que el suministro de aceites y grasas representa entre el 70 % y el 90 % de los costos operativos totales, lo que introduce una dependencia estructural del mercado global de aceites vegetales. Esta situación genera incertidumbre respecto a la escalabilidad de la tecnología, especialmente considerando la disponibilidad limitada de residuos lipídicos como los aceites de cocina usados y las grasas animales. En consecuencia, aunque la HEFA continuará desempeñando un papel dominante en la implementación inicial de los combustibles sostenibles de aviación, su potencial de expansión global podría verse restringido por la disponibilidad sostenible de materias primas.

En contraste, las materias primas lignocelulósicas, que incluyen residuos forestales, madera de rotación corta y residuos agrícolas, representan una alternativa estratégicamente más robusta desde una perspectiva de largo plazo. Estos recursos presentan una ventaja fundamental: su abundancia y amplia distribución geográfica, así como su mínima competencia con la producción de alimentos. Desde el punto de vista de la bioeconomía, el aprovechamiento de estos residuos permitiría integrar las cadenas productivas agrícolas y forestales en sistemas de biorrefinería orientados a la producción de combustibles avanzados.

Sin embargo, la conversión de biomasa lignocelulósica en hidrocarburos de rango jet continúa enfrentando desafíos tecnológicos significativos. La estructura compleja de la lignocelulosa, caracterizada por la interacción entre la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, exige procesos de pretratamiento intensivos y rutas de conversión termoquímica o bioquímica más sofisticadas. Tecnologías como la gasificación seguida de síntesis Fischer-Tropsch o la licuefacción hidrotérmica presentan un elevado potencial para la producción de combustibles avanzados, pero su implementación a gran escala sigue limitada por los altos requerimientos de capital, la complejidad operativa y los desafíos asociados al escalado industrial.

En conjunto, estas observaciones sugieren que la transición hacia combustibles sostenibles de aviación seguirá una trayectoria tecnológica dual. Mientras que las rutas basadas en aceites y grasas continuarán liderando el despliegue comercial en el corto plazo, las plataformas

basadas en biomasa lignocelulósica probablemente constituirán el pilar fundamental para la expansión del sector en el largo plazo, particularmente en países con abundantes recursos agroforestales.

Las materias primas más usadas para la producción de bioturbosina, reportadas en la literatura científica entre 2015 y 2020, son:

Cultivos oleaginosos y grasas (aceites)

Los cultivos oleaginosos y las grasas constituyen una de las materias primas más importantes para la producción de combustibles sostenibles de aviación, especialmente en la ruta tecnológica de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA), considerada actualmente la alternativa más madura desde el punto de vista comercial (Starck *et al.*, 2016).

Estas materias primas se caracterizan por su alto contenido de lípidos, compuestos orgánicos formados principalmente por triglicéridos, los cuales consisten en moléculas de glicerol unidas a tres cadenas de ácidos grasos de longitud variable (Vaisali *et al.*, 2015). Los ácidos grasos presentes en estos aceites suelen tener entre 14 y 22 átomos de carbono, lo que facilita su conversión en hidrocarburos de rango jet mediante procesos de hidrodesoxigenación, hidrocrackeo e hidroisomerización.

Los aceites comestibles de primera generación incluyen materias primas como el aceite de soja (Pearlson *et al.*, 2013), colza (rapeseed), maíz (Barrera-Arellano *et al.*, 2019), girasol, cacahuete y palma (Gesteiro *et al.*, 2019).

Desde el punto de vista fisicoquímico, estos aceites presentan un alto contenido de ácidos grasos insaturados, principalmente el ácido oleico (C18:1), el ácido linoleico (C18:2) y el ácido linolénico (C18:3) (Zhang *et al.*, 2020). La presencia de estas cadenas hidrocarbonadas permite obtener fracciones de hidrocarburos parafínicos e isoparafínicos con propiedades similares al queroseno de aviación después del procesamiento catalítico (Verma *et al.*, 2015). Sin embargo, el uso de aceites comestibles ha sido objeto de debate debido a su potencial competencia con la producción de alimentos.

Por esta razón, se ha promovido el uso de aceites no comestibles de segunda generación, provenientes de cultivos adaptados a suelos marginales o a condiciones ambientales adversas. Entre estos se destacan especies como la *Jatropha*, la camelina, el ricino, la macauba, la carinata y la salicornia (Hunsberger y Alonso-Fradejas, 2016; Shah *et al.*, 2019). Estos cultivos presentan composiciones lipídicas particulares; por ejemplo, el aceite de ricino contiene altas concentraciones de ácido ricinoleico (Suhail *et al.*, 2015), mientras que la camelina posee elevados niveles de ácidos grasos poliinsaturados (Y. Li y Sun, 2015). Estas características influyen en las condiciones de procesamiento requeridas para su conversión en combustibles.

Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica es considerada una de las materias primas más prometedoras para la producción de combustibles sostenibles de aviación a largo plazo debido a su abundancia,

bajo costo y mínima competencia con la producción de alimentos. Desde el punto de vista estructural, estos materiales están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, tres biopolímeros que forman la estructura de las paredes celulares de las plantas (Sorieul *et al.*, 2016). La celulosa es un polímero lineal de glucosa con alto grado de cristalinidad, la hemicelulosa es un heteropolímero amorfo compuesto por azúcares de cinco y seis carbonos, mientras que la lignina es un polímero aromático complejo que proporciona rigidez y resistencia estructural a la biomasa (Sorieul *et al.*, 2016).

Los residuos forestales y la madera constituyen una fuente importante de biomasa lignocelulósica. Especies de rápido crecimiento, como el eucalipto, el álamo (*poplar*) y el sauce (*willow*), se utilizan ampliamente debido a su alta productividad y a su contenido relativamente elevado de celulosa, que puede superar el 40 % de la masa seca (Bekele *et al.*, 2018; Przybysz *et al.*, 2018).

Los residuos derivados de operaciones forestales, tales como aserrín, corteza, hojas y ramas, presentan propiedades energéticas favorables para procesos termoquímicos como la gasificación, la pirólisis o la licuefacción hidrotérmica (Braghiroli y Passarini, 2020).

Los residuos agrícolas representan otra fuente significativa de biomasa lignocelulósica. Entre los más estudiados se encuentran el rastrojo de maíz, la paja de trigo, la paja y cascarilla de arroz (Biswas *et al.*, 2017) y el bagazo de caña de azúcar (Hernández *et al.*, 2019).

Estos materiales contienen proporciones variables de celulosa (30–50 %), hemicelulosa (20–35 %) y lignina (10–25 %), lo que determina su comportamiento durante los procesos de conversión energética. La presencia de lignina, por ejemplo, favorece la formación de compuestos aromáticos durante los procesos termoquímicos (Biswas *et al.*, 2017).

Además, se han desarrollado cultivos energéticos herbáceos específicamente para la producción de bioenergía. Entre ellos se destacan el *switchgrass*, el *miscanthus* y el pasto Napier, especies caracterizadas por su alta productividad de biomasa, eficiencia en el uso de nutrientes y capacidad de crecer en suelos de baja calidad (Mitchell *et al.*, 2016). Estas plantas presentan composiciones lignocelulósicas que facilitan su procesamiento en biorrefinerías orientadas a la producción de combustibles avanzados.

Azúcares y almidones

Los azúcares y los almidones constituyen materias primas ampliamente utilizadas en rutas bioquímicas para la producción de combustibles sostenibles de aviación, especialmente en procesos de fermentación microbiana y conversión catalítica en fase acuosa.

Desde el punto de vista químico, los azúcares son carbohidratos simples compuestos por unidades de monosacáridos que pueden ser metabolizados por microorganismos para producir alcoholes, hidrocarburos u otros intermediarios químicos de interés energético (Farrán *et al.*, 2015).

Los cultivos tradicionales ricos en azúcares o almidón incluyen la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el sorgo dulce, el trigo y el maíz. En el caso de la caña de azúcar y la remolacha, los azúcares predominantes son la sacarosa, la glucosa y la fructosa, los cuales pueden ser fermentados directamente para producir etanol (Duraism *et al.*, 2017). Por otro lado, cultivos ricos en almidón como el maíz o el trigo requieren procesos de hidrólisis enzimática para convertir el almidón en glucosa antes de la fermentación. El almidón es un polisacárido formado por cadenas de glucosa organizadas en dos fracciones principales: la amilosa y la amilopectina (Hoyos-Leyva *et al.*, 2017).

Adicionalmente, los azúcares derivados de biomasa lignocelulósica han adquirido gran relevancia en el desarrollo de biocombustibles avanzados. Mediante procesos de pretratamiento e hidrólisis enzimática es posible liberar azúcares de cinco y seis carbonos, como la glucosa, la xilosa y la arabinosa, a partir de materiales lignocelulósicos. Estos azúcares pueden ser fermentados por microorganismos para producir alcoholes o convertidos catalíticamente en compuestos intermedios como hidrocarburos ligeros, cetonas o ácidos orgánicos (Mika *et al.*, 2017). La versatilidad química de estos azúcares los convierte en una plataforma clave para la producción de múltiples intermediarios energéticos en biorrefinerías integradas.

Algas (3ª generación)

Las algas, tanto microalgas como macroalgas, han sido ampliamente investigadas como materias primas de tercera generación para la producción de combustibles sostenibles de aviación (Moreno-García *et al.*, 2017).

Estos organismos fotosintéticos presentan ventajas significativas frente a cultivos terrestres tradicionales, entre ellas su rápido crecimiento, su alta eficiencia en la conversión de energía solar y su capacidad paracapturardióxidodecarbonoatmosférico o industrial (D bowski et al., 2020). Además, muchas especies de microalgas pueden cultivarse en sistemas acuáticos que no requieren tierras agrícolas, lo que reduce la competencia con la producción de alimentos. Desde el punto de vista fisicoquímico, algunas microalgas pueden acumular entre el 20 % y el 60 % de su peso seco en forma de lípidos, principalmente triglicéridos y ácidos grasos de cadena larga (Brennan y Owende, 2010). Estas moléculas pueden ser convertidas en combustibles mediante procesos similares a los utilizados para aceites vegetales. Entre las especies más estudiadas se encuentran la *Spirulina*, la *Nannochloropsis* y *Botryococcus braunii*, esta última conocida por su capacidad para producir hidrocarburos naturales similares al petróleo (Matos et al., 2016).

Además de los lípidos, las algas contienen carbohidratos, proteínas y pigmentos bioactivos que pueden valorizarse en biorrefinerías integradas (Brennan y Owende, 2010). No obstante, la producción de biocombustibles a partir de algas aún enfrenta desafíos relacionados con los costos de cultivo, la cosecha y la extracción de compuestos energéticos.

Compuestos intermedios de origen bio

En el desarrollo de tecnologías avanzadas para combustibles sostenibles de aviación, se ha explorado el uso de compuestos intermedios derivados de biomasa como

plataformas químicas para la síntesis de hidrocarburos de rango jet. Estos compuestos pueden obtenerse mediante fermentación microbiana, transformación catalítica de azúcares o conversión termoquímica de biomasa.

Un grupo de compuestos intermedios de interés en la investigación corresponde a los terpenos e isoprenoides, compuestos orgánicos derivados de la biosíntesis de unidades de isopreno (Tetali, 2018). Entre ellos se encuentran moléculas como el farneseno, el bisabolenos, el limoneno, el pineno, el prespatano y el eucaliptol. Estos compuestos pueden producirse mediante microorganismos modificados genéticamente y posteriormente transformarse en hidrocarburos de aviación mediante hidrogenación y otros procesos catalíticos (Walls y Rios-Solis, 2020).

Existen diversas plataformas químicas derivadas de biomasa, como el furfural, el 2-metilfurano, las cetonas y el sorbitol (Gómez Millán et al., 2019). Estas moléculas pueden transformarse mediante procesos de desoxigenación, condensación o hidrogenación en hidrocarburos de cadena larga con propiedades adecuadas para combustibles aeronáuticos (H. Li et al., 2017).

El desarrollo de estas plataformas químicas representa un enfoque innovador dentro del campo de las biorrefinerías, permitiendo integrar procesos biotecnológicos y catalíticos para producir combustibles sostenibles de alta calidad.

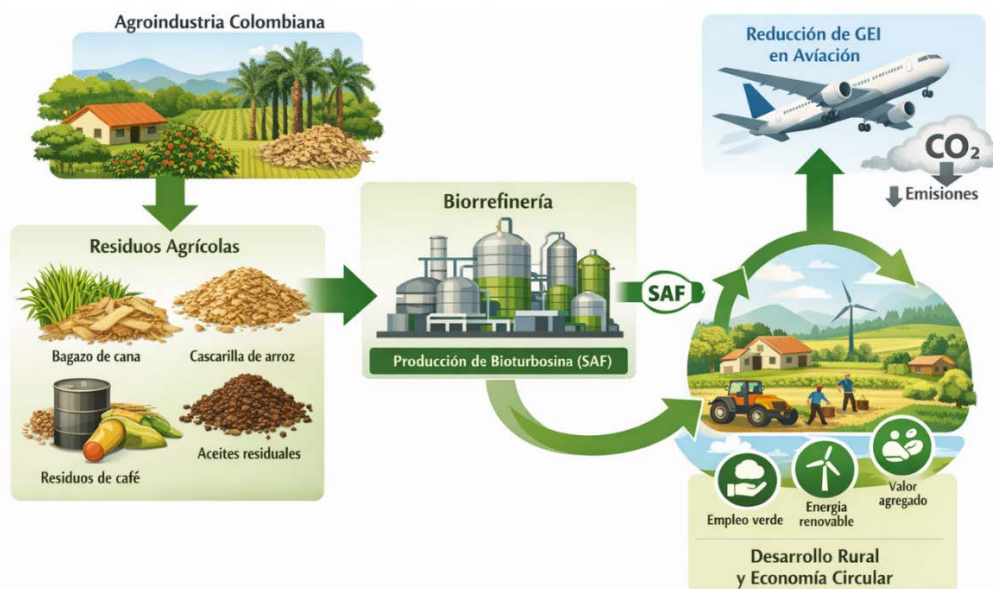
Materias primas para producción de SAF disponibles en Colombia

En la Figura 4 se presenta un modelo de bioeconomía para la producción de bioturbosina en Colombia, considerando las materias primas disponibles a partir de la producción agropecuaria nacional.

Residuos lignocelulósicos

Los residuos lignocelulósicos constituyen una de las fuentes de biomasa más prometedoras para la producción de combustibles sostenibles de aviación debido a su abundancia, bajo costo y disponibilidad como subproductos de actividades agrícolas y forestales (Aristizábal Marulanda, 2015).

Figura 4. Modelo de bioeconomía para la producción de bioturbosina (SAF) en Colombia



SAF: Sustainable Aviation Fuel

Fuente. Elaboración propia.

En Colombia, durante el periodo 2015–2020, el crecimiento sostenido de varios sectores agroindustriales generó grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos que podrían ser aprovechados como materias primas para la producción de bioturbosina.

Entre los principales residuos disponibles en el país se encuentran el bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de arroz, los rastrojos de

maíz y diversos residuos forestales derivados de actividades de aprovechamiento maderero y plantaciones comerciales (Acosta *et al.*, 2018). La agroindustria de la caña de azúcar, concentrada principalmente en el Valle del Cauca, produce anualmente millones de toneladas de bagazo que actualmente se utilizan principalmente para la generación de energía en ingenios azucareros, pero que también presentan

un alto potencial para la producción de biocombustibles avanzados mediante rutas termoquímicas como la gasificación y la síntesis Fischer-Tropsch (Correa-García *et al.*, 2018; Dussán *et al.*, 2019).

De manera similar, la producción de arroz en regiones como Tolima, Meta y Casanare genera grandes cantidades de cascarilla, un residuo rico en lignocelulosa y sílice que puede ser utilizado como fuente de carbono para procesos de conversión energética (Hoyos *et al.*, 2019). Los rastrojos de maíz, ampliamente distribuidos en zonas agrícolas del país, representan otra fuente significativa de biomasa lignocelulósica susceptible de ser aprovechada en esquemas de biorrefinería.

Asimismo, el sector forestal colombiano genera residuos derivados de operaciones de aserrado, poda y manejo de plantaciones comerciales de especies como el eucalipto y el pino. Estos residuos presentan características fisicoquímicas adecuadas para su conversión en combustibles líquidos mediante tecnologías como la pirólisis rápida o la licuefacción hidrotérmica.

La disponibilidad de estos residuos lignocelulósicos posiciona a Colombia como un país con alto potencial para el desarrollo de biorrefinerías orientadas a la producción de combustibles sostenibles de aviación.

Aceites y grasas

Los aceites y grasas constituyen una de las materias primas más utilizadas a nivel global para la producción de combustibles sostenibles de aviación debido a su elevada densidad energética y

a la madurez tecnológica de los procesos de hidroprocesamiento. La ruta tecnológica basada en ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA) ha demostrado ser una de las alternativas más viables para la producción de bioturbosina, ya que permite transformar lípidos en hidrocarburos parafínicos compatibles con los combustibles de aviación convencionales.

En Colombia, entre 2015 y 2020, la disponibilidad de aceites y grasas estuvo estrechamente relacionada con el desarrollo de las industrias de palma de aceite, procesamiento de alimentos y producción pecuaria (Marin-Burgos y Clancy, 2017). El país es uno de los principales productores de aceite de palma en América Latina, con extensas plantaciones ubicadas en regiones como el Magdalena Medio y los Llanos Orientales (Pardo Vargas *et al.*, 2015). Durante el procesamiento del fruto de palma se generan fracciones residuales de aceite y subproductos grasos que pueden ser utilizados como materias primas para la producción de biocombustibles avanzados.

Además del aceite de palma residual, los aceites de cocina usados representan otra fuente relevante de materia prima para la producción de bioturbosina. Estos residuos se generan principalmente en sectores urbanos asociados a restaurantes, hoteles e industrias de alimentos.

Su aprovechamiento permite no solo producir combustibles sostenibles, sino también reducir los impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada en sistemas de alcantarillado o cuerpos de agua.

Las grasas animales, provenientes principalmente de la industria cárnica y de procesamiento de subproductos pecuarios, constituyen otra fuente potencial de lípidos para la producción de SAF.

Estos materiales presentan composiciones químicas adecuadas para su conversión mediante procesos de hidrotratamiento, permitiendo obtener hidrocarburos de rango jet con propiedades fisicoquímicas compatibles con los estándares internacionales de combustibles de aviación.

El aprovechamiento de aceites y grasas residuales en Colombia podría contribuir significativamente al desarrollo de una economía circular en el sector energético, al transformar residuos orgánicos en combustibles de alto valor agregado.

Subproductos agroindustriales

Además de los residuos lignocelulósicos y las fracciones lipídicas, diversas cadenas agroindustriales en Colombia generan subproductos orgánicos que podrían ser aprovechados como materias primas para la producción de combustibles sostenibles de aviación.

Estos materiales incluyen residuos provenientes del procesamiento de alimentos, frutas y productos agrícolas que actualmente se utilizan principalmente como abonos orgánicos, como alimentación animal o que, en algunos casos, son descartados sin un aprovechamiento energético significativo.

Entre los subproductos agroindustriales con mayor potencial se encuentran la cáscara de papa, los residuos de banano, la pulpa de frutas y los residuos derivados del procesamiento del café (Alarcón García *et al.*, 2015). La producción de papa en Colombia genera grandes cantidades de cáscaras durante los procesos de lavado y pelado en la industria alimentaria.

Este residuo contiene almidones, fibras y compuestos orgánicos que pueden ser utilizados como sustratos para procesos bioquímicos de fermentación orientados a la producción de alcoholes, los cuales posteriormente pueden convertirse en combustibles de aviación mediante tecnologías como Alcohol-to-Jet (ATJ) (Kot *et al.*, 2020).

La industria bananera, concentrada principalmente en las regiones de Urabá y Magdalena, produce residuos significativos durante el procesamiento y la clasificación de la fruta para exportación (Evans *et al.*, 2020). Estos residuos incluyen cáscaras, pulpas y frutos descartados que contienen altos niveles de carbohidratos y compuestos orgánicos susceptibles de ser transformados en bioenergía.

Por su parte, la industria de procesamiento de frutas genera pulpas residuales y subproductos ricos en azúcares fermentables que podrían integrarse en esquemas de biorrefinería. Finalmente, el sector cafetero colombiano produce grandes cantidades de residuos como la pulpa de café y la cascarilla durante las etapas de beneficio y procesamiento del grano.

Estos subproductos contienen compuestos lignocelulósicos y azúcares que pueden ser transformados en biocombustibles mediante procesos termoquímicos o bioquímicos.

El aprovechamiento energético de estos subproductos agroindustriales representa una oportunidad para diversificar las cadenas de valor rurales, promover la bioeconomía y reducir el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos orgánicos.

Barreras que Colombia debe superar para la producción comercial de SAF

La producción de biocombustible para aviones (bio-jet) enfrenta diversas barreras tecnológicas que van desde el pretratamiento de la materia prima hasta la optimización de los procesos de conversión y la calidad del producto final.

Las principales barreras identificadas en las fuentes son:

A pesar del significativo potencial que posee Colombia para producir combustibles sostenibles de aviación (SAF) a partir de biomasa y subproductos agroindustriales, la implementación a escala comercial de estas tecnologías enfrenta múltiples desafíos. Estas barreras incluyen limitaciones tecnológicas, logísticas, económicas y regulatorias que deben ser abordadas de manera integral para permitir el desarrollo de una industria nacional de bioturbosina. Además, existen desafíos asociados al pretratamiento de materias primas, a la eficiencia de los procesos de conversión y a la calidad final del combustible producido.

Barreras tecnológicas

Uno de los principales desafíos para la producción de SAF a partir de biomasa radica en la complejidad de los procesos de conversión química requeridos para transformar compuestos orgánicos altamente oxigenados en hidrocarburos compatibles con los combustibles de aviación. La biomasa presenta una composición química muy diferente a la de los hidrocarburos fósiles, caracterizada por un elevado contenido de oxígeno y una menor proporción de hidrógeno. Como consecuencia, los procesos de conversión requieren etapas intensivas de desoxigenación catalítica, tales como la hidrodeseoxigenación, el hidrocrackeo y la hidroisomerización (Wei *et al.*, 2019).

Estos procesos demandan grandes cantidades de hidrógeno, cuyo suministro en la actualidad depende principalmente de fuentes fósiles, lo que incrementa los costos de producción y reduce parcialmente los beneficios ambientales del combustible resultante. Además, muchos de los esquemas tecnológicos actualmente en desarrollo implican rutas multietapa, que incluyen varias reacciones intermedias y operaciones de separación. Esta complejidad aumenta tanto el consumo energético como los costos operativos de las plantas industriales.

Otro desafío tecnológico relevante es la formación de coque sobre los catalizadores, fenómeno que ocurre debido al alto contenido de compuestos oxigenados presentes en los bioaceites derivados de biomasa (Hu *et al.*, 2020).

La deposición de coque provoca la desactivación progresiva de los catalizadores, reduciendo su vida útil y afectando la estabilidad del proceso (Barbarias *et al.*, 2018). Asimismo, cuando los procesos se escalan desde el laboratorio hacia sistemas industriales, surgen limitaciones adicionales relacionadas con fenómenos de transferencia de masa y difusión que no son evidentes en estudios a pequeña escala.

Desafíos en el pretratamiento y manejo de materias primas

La biomasa presenta una naturaleza altamente heterogénea, lo que convierte al pretratamiento en una etapa crítica dentro de las cadenas de conversión hacia combustibles de aviación. Factores como el contenido de humedad, la densidad aparente y la composición química varían significativamente entre diferentes tipos de biomasa, lo que dificulta la estandarización de los procesos de conversión. En el caso de la biomasa lignocelulósica, los procesos de pretratamiento necesarios para liberar azúcares fermentables o producir bioaceites pueden generar compuestos inhibitorios, tales como el furfural, el hidroximetilfurfural, los ácidos orgánicos y los compuestos fenólicos (Mithra *et al.*, 2018). Estas moléculas pueden afectar negativamente la actividad metabólica de los microorganismos utilizados en procesos de fermentación, reduciendo la eficiencia global de las rutas bioquímicas (Duraism *et al.*, 2017).

Adicionalmente, el manejo de grandes volúmenes de biomasa implica desafíos logísticos importantes.

La baja densidad energética de muchos residuos agrícolas aumenta los costos asociados a su transporte y almacenamiento. Asimismo, durante el almacenamiento prolongado pueden ocurrir procesos de degradación biológica o pérdida de contenido energético, lo que reduce la calidad de la materia prima disponible para su conversión en combustibles.

Barreras logísticas

Desde el punto de vista logístico, la disponibilidad de biomasa en Colombia presenta una alta dispersión geográfica, ya que los residuos agrícolas y forestales se generan en múltiples regiones del país. Esta distribución territorial dificulta la consolidación de cadenas de suministro eficientes para alimentar instalaciones industriales de producción de SAF.

Además, muchos residuos agroindustriales presentan baja densidad volumétrica, lo que incrementa los costos de transporte en comparación con los combustibles líquidos convencionales (Magalhães *et al.*, 2019). La recolección de biomasa también requiere sistemas especializados de almacenamiento y acondicionamiento que permitan mantener su estabilidad física y química antes de su procesamiento. En el caso de residuos orgánicos con alto contenido de humedad, como los provenientes de la agroindustria alimentaria, existe además el riesgo de degradación microbiana durante el almacenamiento. Estas limitaciones logísticas hacen necesario desarrollar modelos regionales de biorrefinería que permitan procesar la biomasa cerca de su lugar de origen, reduciendo así los costos asociados a la cadena de suministro.

Barreras económicas

Desde el punto de vista económico, uno de los principales obstáculos para la adopción de combustibles sostenibles de aviación es su costo de producción. En la actualidad, el SAF puede ser entre dos y cuatro veces más costoso que el combustible fósil de aviación convencional. Esta diferencia se explica principalmente por el alto costo de las materias primas, la complejidad de los procesos de conversión y las elevadas inversiones de capital necesarias para construir instalaciones industriales de biorrefinería.

La producción de bioturbosina requiere infraestructuras tecnológicas avanzadas, como unidades de gasificación, reactores catalíticos de alta presión y sistemas de purificación complejos (Crawford *et al.*, 2016).

Estas instalaciones implican costos de inversión significativos que solo pueden amortizarse mediante economías de escala o a través de mecanismos de apoyo gubernamental.

Sin incentivos económicos, tales como créditos fiscales, subsidios a la producción o mecanismos de mercado que valoren la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la competitividad del SAF frente a los combustibles fósiles sigue siendo limitada. En este sentido, el desarrollo de mercados de carbono y políticas de transición energética podría desempeñar un papel clave para cerrar esta brecha de costos.

Barreras regulatorias e institucionales

El desarrollo de una industria nacional de SAF también requiere marcos regulatorios claros que establezcan incentivos y lineamientos para su producción, certificación y uso en el sector aeronáutico. La ausencia de políticas públicas específicas orientadas a la promoción de combustibles sostenibles de aviación ha limitado hasta ahora el avance de proyectos industriales en muchos países en desarrollo. Para que Colombia pueda posicionarse como productor de bioturbosina, será necesario implementar políticas que promuevan la inversión en investigación y desarrollo, así como incentivos fiscales que faciliten la instalación de biorrefinerías. Asimismo, se requiere la armonización de regulaciones nacionales con los estándares internacionales de calidad y seguridad de combustibles de aviación, como los definidos por ASTM International.

Desafíos asociados a la calidad del combustible

La producción de combustibles sostenibles de aviación enfrenta retos relacionados con las propiedades fisicoquímicas del combustible obtenido. Algunas rutas tecnológicas, como HEFA o la síntesis Fischer-Tropsch, generan principalmente hidrocarburos parafínicos que presentan bajos contenidos de compuestos aromáticos (Richter *et al.*, 2018). Sin embargo, los aromáticos desempeñan un papel importante en los combustibles de aviación convencionales, ya que contribuyen a mantener la elasticidad de los sellos de los sistemas de combustible de las aeronaves (Duong *et al.*, 2018).

Adicionalmente, ciertos hidrocarburos derivados de biomasa pueden presentar densidades inferiores al límite mínimo requerido para combustibles de aviación, o viscosidades y puntos de congelación elevados (Shah *et al.*, 2019). Estas características obligan en muchos casos, a mezclar el SAF con combustibles fósiles convencionales para cumplir con las especificaciones técnicas establecidas para su uso en aeronaves.

Superar estas limitaciones tecnológicas y regulatorias será fundamental para consolidar la producción de combustibles sostenibles de aviación en Colombia y permitir su integración dentro de las estrategias de descarbonización del sector aeronáutico.

Conclusiones

Entre 2015 y 2020, el desarrollo de combustibles sostenibles de aviación experimentó avances significativos en términos tecnológicos y de investigación. Las rutas HEFA y Fischer-Tropsch se consolidaron como las tecnologías más maduras para la producción de bioturbosina, mientras que procesos emergentes, como ATJ y HTL, continúan en fase de desarrollo.

Colombia posee un importante potencial para la producción de SAF, gracias a la disponibilidad de residuos agroindustriales provenientes de cadenas productivas como la caña de azúcar, el arroz, el café y el banano. La valorización de estos subproductos podría contribuir simultáneamente a la transición energética y al desarrollo de una bioeconomía basada en biorrefinerías.

No obstante, la implementación comercial de estas tecnologías requerirá superar barreras tecnológicas, económicas y regulatorias. En este contexto, la articulación entre el sector académico, la industria y el gobierno será fundamental para consolidar una estrategia nacional de combustibles sostenibles de aviación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Red de Movilidad Internacional DELFÍN y a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia por permitir el intercambio internacional y la disponibilidad de recursos para ejecutar la investigación.

Referencias

- Acosta, R., Sanabria, J., y Nabarlatz, D. (2018). Biomass from colombian agroindustrial activities: Characterization and potential for oligosaccharides production. *Chemical Engineering Transactions*, 65, 667–672. <https://doi.org/10.3303/CET1865112>
- Alarcón García, M. Á., López Vargas, J. H., y Restrepo Molina, D. A. (2015). Agro-industrial fruit co-products in Colombia, their sources and potential uses in processed food industries: a review. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(2), 7729–7742. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n2.50993>

- Aristizábal Marulanda, V. (2015). *Producción de biocombustible de avión a partir de residuos agroindustriales a través de una plataforma de furfural*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54008>
- Atsonios, K., Kougioumtzis, M. A., Panopoulos, K. D., y Kakaras, E. (2015). Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. *Applied Energy*, 138, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.056>
- Barbarias, I., Artetxe, M., Lopez, G., Arregi, A., Bilbao, J., y Olazar, M. (2018). Influence of the conditions for reforming HDPE pyrolysis volatiles on the catalyst deactivation by coke. *Fuel Processing Technology*, 171, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.003>
- Barrera-Arellano, D., Badan-Ribeiro, A. P., y Serna-Saldivar, S. O. (2019). Corn Oil: Composition, Processing, and Utilization. *Corn: Chemistry and Technology*, 3rd Edition, 593–613. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00021-8>
- Bekele, T. D., Kidanemariam, B., Bahiru, T., Semere, M., Sisaya, K., y Tadesse, E. (2018). Comparative growth performance of fast-growing tree species for woodfuel production in highland area of Ethiopia. *Horticulture International Journal*, 2(6). <https://doi.org/10.15406/hij.2018.02.00069>
- Benedetti, V., Ail, S. S., Patuzzi, F., Cristofori, D., Rauch, R., y Baratieri, M. (2020). Investigating the feasibility of valorizing residual char from biomass gasification as catalyst support in Fischer-Tropsch synthesis. *Renewable Energy*, 147, 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.050>
- Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J., y Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*, 237, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>
- Braghirolli, F. L., y Passarini, L. (2020). Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. In *Current Forestry Reports*, 6(2), 172–183. Springer. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00112-9>
- Brennan, L., y Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Chand, R., Babu Borugadda, V., Qiu, M., y Dalai, A. K. (2019). Evaluating the potential for bio-fuel upgrading: A comprehensive analysis of bio-crude and bio-residue from hydrothermal liquefaction of agricultural biomass. *Applied Energy*, 254, 113679. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113679>

- Chiodini, A., Bua, L., Carnelli, L., Zwart, R., Vreugdenhil, B., y Vocciante, M. (2017). Enhancements in Biomass-to-Liquid processes: Gasification aiming at high hydrogen/carbon monoxide ratios for direct Fischer-Tropsch synthesis applications. *Biomass and Bioenergy*, 106, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.022>
- Correa-García, E., Vélez-Correa, J., Zapata-Caldas, E., Vélez-Torres, I., y Figueroa-Casas, A. (2018). Territorial transformations produced by the sugarcane agroindustry in the ethnic communities of López Adentro and El Tiple, Colombia. *Land Use Policy*, 76, 847–860. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.026>
- Crawford, J. T., Shan, C. W., Budsberg, E., Morgan, H., Bura, R., y Gustafson, R. (2016). Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: Techno-economic assessment. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0545-7>
- Dobowski, M., Zieliński, M., Kazimierowicz, J., Kujawska, N., y Talbierz, S. (2020). Microalgae Cultivation Technologies as an Opportunity for Bioenergetic System Development—Advantages and Limitations. *Sustainability*, 12(23), 9980. <https://doi.org/10.3390/su12239980>
- Díaz-Pérez, M. A., y Serrano-Ruiz, J. C. (2020). Catalytic production of jet fuels from biomass. *Molecules*, 25(4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules25040802>
- Diederichs, G. W., Ali Mandegari, M., Farzad, S., y Görgens, J. F. (2016). Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice. *Bioresource Technology*, 216, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.090>
- Dimitriadis, A., y Bezergianni, S. (2017). Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>
- Doliente, S. S., Narayan, A., Tapia, J. F. D., Samsatli, N. J., Zhao, Y., y Samsatli, S. (2020). Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. *Frontiers in Energy Research* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110>
- Duong, L. H., Reksowardojo, I. K., Soerawidjaja, T. H., Pham, D. N., y Fujita, O. (2018). The sooting tendency of aviation biofuels and jet range paraffins: effects of adding aromatics, carbon chain length of normal paraffins, and fraction of branched paraffins. *Combustion Science and Technology*, 190(10), 1710–1721. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1468323>
- Duraisam, R., Saleh, K., y Kerebo Bereket, A. (2017). Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and its Bagasse: A Review. *International*

- Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 43(4), 222–233. <http://www.ijettjournal.org>
- Dussán, K. J., de Mello, G. F., Floriam, B. G., Ortiz Sanchez, M., Carmona Garcia, E., Cardona, C. A., y Silva, D. D. V. (2019). Sugarcane Biofuel Production in Colombia. *Sugarcane Biofuels*, 237–265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18597-8_11
- Evans, E. A., Ballen, F. H., & Siddiq, M. (2020). Banana production, global trade, consumption trends, postharvest handling, and processing. En M. Siddiq, J. Ahmed, M. G. Lobo, & S. Ozadali (Eds.), *Handbook of banana production, postharvest science, processing technology, and nutrition* (pp. 1–18). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119528265.ch1>
- Farrán, A., Cai, C., Sandoval, M., Xu, Y., Liu, J., Hernáiz, M. J., y Linhardt, R. J. (2015). Green Solvents in Carbohydrate Chemistry: From Raw Materials to Fine Chemicals. *In Chemical Reviews*, 115(14), 6811–6853. <https://doi.org/10.1021/cr500719h>
- Geleynse, S., Brandt, K., Garcia-Perez, M., Wolcott, M., y Zhang, X. (2018). The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation. *ChemSusChem*, 11(21), 3728–3741. <https://doi.org/10.1002/cssc.201801690>
- Gesteiro, E., Guijarro, L., Sánchez-Muniz, F. J., Del Carmen Vidal-Carou, M., Troncoso, A., Venanci, L., Jimeno, V., Quilez, J., Anadón, A., y González-Gross, M. (2019). Palm Oil on the Edge. *Nutrients*, 11(9), 2008. <https://doi.org/10.3390/nu11092008>
- Gómez Millán, G., Hellsten, S., Llorca, J., Luque, R., Sixta, H., y Balu, A. M. (2019). Recent Advances in the Catalytic Production of Platform Chemicals from Holocellulosic Biomass. *ChemCatChem*, 11(8), 2022–2042. <https://doi.org/10.1002/cctc.201801843>
- Hernández, C., Escamilla-Alvarado, C., Sánchez, A., Alarcón, E., Ziarelli, F., Musule, R., y Valdez-Vazquez, I. (2019). Wheat straw, corn stover, sugarcane, and Agave biomasses: chemical properties, availability, and cellulosic-bioethanol production potential in Mexico. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(5), 1143–1159. <https://doi.org/10.1002/bbb.2017>
- Hoyos, V., Plaza, G., y Caicedo, A. L. (2019). Characterization of the phenotypic variability in Colombian weedy rice (*Oryza* spp.). *Weed Science*, 67(4), 441–452. <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.18>
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Alvarez-Ramirez, J., y Agama-Acevedo, E. (2017). Structural characterization of aroid starches by means of chromatographic techniques. *Food Hydrocolloids*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.01.034>

- Hu, X., Zhang, Z., Gholizadeh, M., Zhang, S., Lam, C. H., Xiong, Z., y Wang, Y. (2020). Coke Formation during Thermal Treatment of Bio-oil. *Energy & Fuels*, 34(7), 7863–7914. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01323>
- Hunsberger, C., y Alonso-Fradejas, A. (2016). The discursive flexibility of ‘flex crops’: comparing oil palm and jatropha. *The Journal of Peasant Studies*, 43(1), 225–250. <https://doi.org/10.1080/03066150.2015.1052802>
- Jiménez-Díaz, L., Caballero, A., Pérez-Hernández, N., y Segura, A. (2017). Microbial alkane production for jet fuel industry: Motivation, state of the art and perspectives. *Microbial Biotechnology*, 10(1), 103–124. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12423>
- Junne, S., y Kabisch, J. (2017). Fueling the future with biomass: Processes and pathways for a sustainable supply of hydrocarbon fuels and biogas. In *Engineering in Life Sciences*, 17(1), 14–26. <https://doi.org/10.1002/elsc.201600112>
- Kandaramath Hari, T., Yaakob, Z., y Binitha, N. N. (2015). Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1234–1244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>
- Kim, Y., Lee, J., y Ahn, J. (2019). Innovation towards sustainable technologies: A socio-technical perspective on accelerating transition to aviation biofuel. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.04.002>
- Klein-Marcuschamer, D., Turner, C., Allen, M., Gray, P., Dietzgen, R. G., Gresshoff, P. M., Hankamer, B., Heimann, K., Scott, P. T., Stephens, E., Speight, R., y Nielsen, L. K. (2013). Technoeconomic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(4), 416–428. <https://doi.org/10.1002/bbb.1404>
- Kot, A. M., Pobiega, K., Piwowarek, K., Kieliszek, M., Błażej, S., Gniewosz, M., y Lipińska, E. (2020). Biotechnological Methods of Management and Utilization of Potato Industry Waste—a Review. *Potato Research*, 63(3), 431–447. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09449-6>
- Kousoulidou, M., y Lonza, L. (2016). Biofuels in aviation: Fuel demand and CO₂ emissions evolution in Europe toward 2030. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.018>
- Li, H., Riisager, A., Saravanamurugan, S., Pandey, A., Sangwan, R. S., Yang, S., y Luque, R. (2017). Carbon-Increasing Catalytic Strategies for Upgrading Biomass into Energy-Intensive Fuels and Chemicals. *ACS Catalysis*, 8(1), 148–187. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b02577>

- Li, Y., y Sun, X. S. (2015). Camelina oil derivatives and adhesion properties. *Industrial Crops and Products*, 73, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.015>
- Magalhães, A. I., de Carvalho, J. C., de Melo Pereira, G. V., Karp, S. G., Câmara, M. C., Medina, J. D. C., y Soccol, C. R. (2019). Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1505–1519. <https://doi.org/10.1002/bbb.2048>
- Marin-Burgos, V., y Clancy, J. S. (2017). Understanding the expansion of energy crops beyond the global biofuel boom: evidence from oil palm expansion in Colombia. *Energy, Sustainability and Society*, 7(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s13705-017-0123-2>
- Matos, Â. P., Feller, R., Moecke, E. H. S., de Oliveira, J. V., Junior, A. F., Derner, R. B., y Sant'Anna, E. S. (2016). Chemical Characterization of Six Microalgae with Potential Utility for Food Application. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(7), 963–972. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2849-y>
- Mawhood, R., Gazis, E., de Jong, S., Hoefnagels, R., y Slade, R. (2016). Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. In *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(4), 462–484. <https://doi.org/10.1002/bbb.1644>
- Michailos, S. (2018). Process design, economic evaluation and life cycle assessment of jet fuel production from sugar cane residue. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37(3), 1227–1235. <https://doi.org/10.1002/ep.12840>
- Mika, L. T., Cséfalvay, E., y Németh, Á. (2017). Catalytic Conversion of Carbohydrates to Initial Platform Chemicals: Chemistry and Sustainability. *Chemical Reviews*, 118(2), 505–613. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00395>
- Mitchell, R. B., Schmer, M. R., Anderson, W. F., Jin, V., Balkcom, K. S., Kiniry, J., Coffin, A., y White, P. (2016). Dedicated Energy Crops and Crop Residues for Bioenergy Feedstocks in the Central and Eastern USA. *Bioengineering Research*, 9, 384–398.
- Mithra, M. G., Jeeva, M. L., Sajeev, M. S., y Padmaja, G. (2018). Comparison of ethanol yield from pretreated lignocellulo-starch biomass under fed-batch SHF or SSF modes. *Heliyon*, 4(10), e00885. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00885>
- Moreno-Garcia, L., Adjallé, K., Barnabé, S., y Raghavan, G. S. V. (2017). Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.024>

- Mupondwa, E., Li, X., Tabil, L., Falk, K., y Gugel, R. (2016). Technoeconomic analysis of camelina oil extraction as feedstock for biojet fuel in the Canadian Prairies. *Biomass and Bioenergy*, 95, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.014>
- Neuling, U., y Kaltschmitt, M. (2015). Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5(4), 367–385. <https://doi.org/10.1007/s13399-014-0154-2>
- O’Connell, A., Kousoulidou, M., Lonza, L., y Weindorf, W. (2019). Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.033>
- Pardo Vargas, L. E., Laurance, W. F., Clements, G. R., y Edwards, W. (2015). The impacts of oil palm agriculture on Colombia’s biodiversity: What we know and still need to know. *Tropical Conservation Science*, 8(3), 828–845. <https://doi.org/10.1177/194008291500800317>
- Pattanaik, B. P., y Misra, R. D. (2017). Effect of reaction pathway and operating parameters on the deoxygenation of vegetable oils to produce diesel range hydrocarbon fuels: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 545–557. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.018>
- Pearlson, M., Wollersheim, C., y Hileman, J. (2013). A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(1), 89–96. <https://doi.org/10.1002/bbb.1378>
- Prussi, M., O’Connell, A., y Lonza, L. (2019). Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28. *Biomass and Bioenergy*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105371>
- Przybysz, K., Małachowska, E., Martyniak, D., Boruszewski, P., Iłowska, J., Kalinowska, H., y Przybysz, P. (2018). Paper y fast growth fiber. In *BioResources*, 13(1).
- Rafati, M., Wang, L., Dayton, D. C., Schimmel, K., Kabadi, V., y Shahbazi, A. (2017). Techno-economic analysis of production of Fischer-Tropsch liquids via biomass gasification: The effects of Fischer-Tropsch catalysts and natural gas co-feeding. *Energy Conversion and Management*, 133, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.051>
- Rauch, R., Hrbek, J., y Hofbauer, H. (2014). Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3(4), 343–362. <https://doi.org/10.1002/wene.97>
- Richter, S., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., y Riedel, U. (2018). Paths to alternative fuels for aviation. *CEAS Aeronautical Journal*, 9(3), 389–403. <https://doi.org/10.1007/s13272-018-0296-1>

- Scheelhaase, J., Maertens, S., y Grimme, W. (2019). Synthetic fuels in aviation - Current barriers and potential political measures. *Transportation Research Procedia*, 43, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.015>
- Shafer, W. D., Gnanamani, M. K., Graham, U. M., Yang, J., Masuku, C. M., Jacobs, G., y Davis, B. H. (2019). Fischer-tropsch: Product selectivity-the fingerprint of synthetic fuels. *Catalysts*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/catal9030259>
- Shah, Z., Veses, R. C., Vaghetti, J. C. P., Amorim, V. D. A., y Silva, R. da. (2019). Preparation of jet engine range fuel from biomass pyrolysis oil through hydrogenation and its comparison with aviation kerosene. *International Journal of Green Energy*, 16(4), 350–360. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1566730>
- Smith, P. M., Gaffney, M. J., Shi, W., Hoard, S., Armendariz, I. I., y Mueller, D. W. (2017). Drivers and barriers to the adoption and diffusion of Sustainable Jet Fuel (SJF) in the U.S. Pacific Northwest. *Journal of Air Transport Management*, 58, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.004>
- Sorieul, M., Dickson, A., Hill, S. J., y Pearson, H. (2016). Plant fibre: Molecular structure and biomechanical properties, of a complex living material, influencing its deconstruction towards a biobased composite. *Materials*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/ma9080618>
- Starck, L., Pidol, L., Jeuland, N., Chapus, T., Bogers, P., y Bauldrey, J. (2016). Production d'huiles végétales hydrotraitées (hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA) – optimisation du rendement. *Oil and Gas Science and Technology*, 71(1). <https://doi.org/10.2516/ogst/2014007>
- Starik, A. M., Savel'ev, A. M., Favorskii, O. N., y Titova, N. S. (2018). Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels. *International Journal of Green Energy*, 15(3), 161–168. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1324790>
- Suhail, A. H., Sakure, A. A., Bharose, A. A., Umale, A. A., Sushil, K., y Subhash, N. (2015). Identification and characterization of low and high ricin containing castor (*Ricinus communis* L.) genotypes. *Vegetos*, 28(3), 92–97. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2015.00071.3>
- Tetali, S. D. (2018). Terpenes and isoprenoids: a wealth of compounds for global use. *Planta* 2018 249:1, 249(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s00425-018-3056-x>
- Tzanetis, K. F., Posada, J. A., y Ramirez, A. (2017). Analysis of biomass hydrothermal liquefaction and biocrude-oil upgrading for renewable jet fuel production: The impact of reaction conditions on production costs and GHG emissions performance. *Renewable Energy*, 113(7), 1388–1398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.104>

- Vaisali, C., Charanyaa, S., Belur, P. D., y Regupathi, I. (2015). Refining of edible oils: A critical appraisal of current and potential technologies. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 13–23. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12657>
- Vásquez, M. C., Silva, E. E., & Castillo, E. F. (2017). Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and their developments for jet biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 105, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.008>
- Verma, D., Rana, B. S., Kumar, R., Sibi, M. G., y Sinha, A. K. (2015). Diesel and aviation kerosene with desired aromatics from hydroprocessing of jatropha oil over hydrogenation catalysts supported on hierarchical mesoporous SAPO-11. *Applied Catalysis A: General*, 490(1), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.11.007>
- Vozka, P., Vrtiška, D., Šimá ek, P., y Kilaz, G. (2019). Impact of Alternative Fuel Blending Components on Fuel Composition and Properties in Blends with Jet A. *Energy y Fuels*, 33(4), 3275–3289. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00105>
- Walls, L. E., y Rios-Solis, L. (2020). Sustainable Production of Microbial Isoprenoid Derived Advanced Biojet Fuels Using Different Generation Feedstocks: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 599560. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.599560>
- Wang, W. C. (2016). Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from Jatropha. *Renewable Energy*, 95, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.107>
- Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J., & Chen, H. (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, 254, 115599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007>
- Zacharopoulou, V., y Lemonidou, A. A. (2018). Olefins from biomass intermediates: A review. In *Catalysts*, 8(1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal8010002>
- Zhang, L., Butler, T. L., y Yang, B. (2020). Recent trends, opportunities and challenges of sustainable aviation fuel. In *Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries* (pp. 85–110). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119152057.ch5>
- Zhang, T., Wang, T., Liu, R., Chang, M., Jin, Q., y Wang, X. (2020). Chemical characterization of fourteen kinds of novel edible oils: A comparative study using chemometrics. *LWT*, 118, 108725. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108725>
- Zhang, Y., Bi, P., Wang, J., Jiang, P., Wu, X., Xue, H., Liu, J., Zhou, X., y Li, Q. (2015). Production of jet and diesel biofuels from renewable lignocellulosic biomass. *Applied Energy*, 150, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.023>

A los autores

La revista *Journal of Research in Engineering Sciences* publica artículos que cumplen con los criterios internacionales de calidad académico-científica, en los cuales se presentan elementos relevantes como la referenciación bibliográfica, las metodologías con base en el diseño experimental científico y el soporte estadístico. Además, el soporte teórico en la discusión de los resultados y conclusiones que aporten al desarrollo sostenible de la sociedad y el ambiente. Los trabajos que se presenten deben ser originales, inéditos, no estar a consideración de otra revista y su contenido debe ser responsabilidad exclusiva de los autores, sin comprometer en forma alguna a la revista. Asimismo, en ella se podrán publicar en inglés los trabajos originalmente escritos en ese idioma, aunque el idioma oficial de la revista es el español. Se debe especificar a qué tipo de artículo corresponde la propuesta:

- a) **Artículo de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- b) **Artículo de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, acerca de un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
- c) **Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo de la ingeniería, haciendo énfasis en la sustentabilidad ambiental y en el desarrollo regional con enfoque territorial. Lo anterior, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

Los trabajos y la correspondencia pueden ser enviados al editor a la siguiente dirección:
Editor Journal of Research in Engineering Sciences
Correo electrónico: JournalofResearch@uniagraria.edu.co
Teléfono: 57 (1) 6671515 ext. 158
Facultad de Ingeniería
Fundación Universitaria Agraria de Colombia- UNIAGRARIA
Calle 170 No. 54A - 10, Villa del Prado. Bogotá, Colombia.

El comité editorial de la publicación Journal of Research in Engineering Sciences considerará los siguientes aspectos para aceptar o rechazar en primera instancia los artículos elegidos para su publicación.

Solicitamos a nuestros colaboradores que tengan presente estas recomendaciones:

- a) El documento, con excepción de la primera página, no debe contener información que permita identificar a los autores.
- b) Los artículos deberán ser enviados a la revista en el formato establecido por la misma y en forma digital.
- c) Las notas de pie de página son de uso exclusivo de la editorial de la revista, no pueden ser empleadas con el fin de presentar la bibliografía.
- d) Los autores deben estar en la capacidad de suministrar la información requerida por parte de los evaluadores.
- e) Los artículos que desean postularse para publicación se recibirán continuamente todo el año, sin embargo, el envío de los artículos no obliga al comité editorial de la revista Journal of Research in Engineering Sciences a realizar su publicación.
- f) Posteriormente se iniciará la evaluación con el envío de copia del material a dos expertos en el tema que sean miembros del comité científico asesor, para que de manera independiente conceptúen sobre la posible publicación del trabajo, considerando los siguientes criterios: calidad o nivel académico, originalidad, aporte al conocimiento y a la docencia, claridad en la presentación, claridad de la redacción y de la literatura, interés y actualidad del tema.
- g) Una vez recogidas las evaluaciones, que pueden ser de aceptación plena, aceptación con modificaciones o rechazo, los resultados son comunicados al autor para que de ser necesario realice los ajustes o modificaciones correspondientes; cuando el autor incorpora las modificaciones solicitadas por los evaluadores, los artículos se envían a un corrector de estilo para iniciar con el proceso de edición.
- h) El artículo no puede aparecer en ningún medio masivo de comunicación sin la autorización expresa de la Decanatura de la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA.

Journal of Research in Engineering Sciences

Publicación de la Fundación Universitaria
Agraria de Colombia, *UNIAGRARIA*.
Editado por Entrelibros SAS
Bogotá D.C. - 2020

Contenido

Nota editorial Decano Javier D. Hoyos-Leyva Ph.D.	5
Daños por frío en banano (<i>Musa sp.</i> grupo AAA, subgrupo Cavendish): respuestas fisicoquímicas integradas y desestabilización de la membrana bajo diferentes temperaturas de almacenamiento Hoyos Leyva J. D., Oviedo Pereira D. G., Villamil Galindo J. E. y Caicedo Chacón W.	8
The addition of <i>Jatropha</i> proteins and bentonite modified the mechanical and barrier properties of a soy protein film Sierra-Sarmiento, M. A., Hurtado-Amado, N., Espitia-Vasquez, R. A. y Hoyos- Leyva, J. D	33
Radish flour obtained by combined osmotic dehydration and microwave drying: Process optimization and application in cookies Cifuentes-Cruz, L. M. y Villamil-Galindo, J. E.	45
Implementación de un sistema de riego automatizado para el cultivo de café en la finca Villa de Lobos, San Francisco, Cundinamarca Álvarez, J. M., Aponte, J. D. y Quintero, L. D.	52
Tendencias actuales en la producción de bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales: una oportunidad para la agroindustria en Colombia Tovar-Díaz, L. A., Gómez-Ángel, K. L. y Hoyos-Leyva, J. D.	61
Instrucciones para los autores	89