

MUTIS



Miltoniopsis hybrida. Mps. [Milt.] 'Breathless' 'Florencia'

Benjamin Córdova 'Valderrama', 2018

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Jefatura de Publicaciones
Carrera 4 n.º 23-76, Módulo 29, of. 203
Piso 2, Bogotá, D. C., Colombia
Tel: (571) 242 7030, Exts. 3120-3132

Rector
CARLOS SÁNCHEZ GAITÁN

Vicerrector Académico
ANDRÉS FRANCO HERRERA

Vicerrectora Administrativa
LILIANA ÁLVAREZ REVELO

Director de Investigación, Creación y Extensión
LEONARDO PINEDA SERNA

Jefe de Publicaciones
MARCO GIRALDO BARRETO

Coordinador Editorial
JUAN CARLOS GARCÍA SAENZ

Coordinación gráfica y diseño y diagramación
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Corrector de estilo
LEONARDO PAIPILLA PARDO

Coordinación editorial y revisión
SYLVANA SILVANA BLANCO ESTRADA

Distribución y ventas
SANDRA GUZMÁN

Asistente administrativa
MARÍA TERESA MURCIA

Mutis es una publicación electrónica semestral de ciencia e investigación editada por la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición editorial de *Mutis*.

Editor

GERARD OLIVAR TOST

Editor de sección

JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

Comité Editorial

MICHAEL AHRENS

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia

JUAN PABLO APARICIO

Universidad Nacional de Salta, Argentina

JUDITH A. CHERNI

Imperial College London, Reino Unido

PEDRO GAJARDO

Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

LEONARDO MARIÑO-RAMÍREZ

NCBI - National Center for Biotechnology Information,
Estados Unidos

LUIS RABELO

Universidad Central de la Florida, Estados Unidos

LORENA NOVOA APONTE

National Institutes of Health, Estados Unidos

MYRON SPECTOR

Harvard University, Estados Unidos

ENRIC TRULLOLS FARRENY

Universidad Politécnica de Cataluña, España

Comité Científico

ALBA GRACIELA ÁVILA

Universidad de los Andes, Colombia

SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca,
Colombia

MÓNICA PUYANA HEGEDUS

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia

Actualmente el contenido está indexado e incluido en Google Scholar, Academia.edu, BASE, Dialnet, Dimensions, Directory of Research Journals Indexing, Electronic Journals Library, Latindex MIAR, Mendeley, PERIODICA, Publindex - Categoría C, PKP index, ROAD, Ulrich's Periodicals Directory, AmelICA, DOAJ, Ebsco (fuente académica), Redib



CONTENIDO

Vol. 11 n.º 2 – II. Edición 2021

A01. Editorial

Javier Hernández Fernández 5

ARTÍCULOS

Simulación del proceso de producción de anhídrido maleico mediante el simulador ChemCAD®
Simulation of the Maleic Anhydride Production Process through ChemCAD® Simulator
Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Ranero González y Eddy Javier Pérez Sánchez 8

Variación del canto de *Myiothlypis fulvicauda* (Parulidae) en ambientes naturales de Ibagué (Tolima, Colombia)
Song Variation of *Myiothlypis fulvicauda* (Parulidae) in Natural Environments in the municipality of Ibagué (Tolima, Colombia)
Daniela Villamizar-Soto, Edwin Orlando López-Delgado y Sergio Losada-Prado 22

Aproximación al tratamiento de aguas residuales del lavado del café con las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desmodesmus armatus*
An Approach for Treating Wet Coffee Processing Wastewater Using Microalgae *Parachlorella kessreli* and *Desmodesmus armatus*
Iván Alberto Sandoval Salazar, Mohamed Toufic Darwich Cedeño, María Del Rosario Castañeda, Wilmer Andrés Torres Munar y Luis Carlos Montenegro Ruiz 32

Selección de tecnologías adaptables para la cosecha de cítricos cultivados en ladera en Colombia
Selection of Customizable Technologies for Hillside Citrus Harvesting in Colombia
Daniel Álvarez Arango y Carlos Augusto Hincapié Llanos 44

Reducción de la concentración de DQO y COT en aguas residuales de la industria farmacéutica empleando ozono catalizado por Fe²⁺. Estudio de caso a escala real
Reduction of the Concentration of COD and TOC in Wastewater from the Pharmaceutical Industry Using Ozone Catalyzed by Fe²⁺. Full-scale Case Study
Camila Pedreros Calvo, Kelly Viviana Valderrama Lopez, Rafael Nikolay Agudelo Valencia, Karina Pérez Cortés y Carlos Enrique Campo 56

Producción de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* bajo factores de estrés salino utilizando un biorreactor de 5 L
Astaxanthin Production in *Haematococcus pluvialis* under Salt Stress Factors Using a 5L Laboratory Bioreactor
Ana Graciela Lancheros Díaz, Luis Eduardo Díaz Barrera y Judith Elena Camacho Kurmen 64

Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca, Colombia
Pre-feasibility Study of a Small Hydroelectric Plant in El Sisga Reservoir, Cundinamarca, Colombia
Nicolás Humberto Pacheco Garzón y Jesús Ernesto Torres Quintero 84

Gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá, Colombia	
Management of Used Tires in Low Complexity Municipalities in the Central Province of the Department of Boyacá, Colombia	
<i>Andrea Angélica Bernal-Figueroa, Zulma Edelmira Rocha-Gil y Leidy Paola Buitrago-Ramírez</i>	96
<hr/>	
Aporte del SENA al Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia	
The Contribution of SENA to Colombian Science, Technology, and Innovation System	
<i>Gustavo Vargas Yara, Darwin Dubay Rodriguez y Aylin Viviana Silva Ortiz</i>	109
<hr/>	
Evaluación rápida de las familias y grupos trófico de aves asociadas a sabanas y bosques de galería en la Reserva El Caduceo, La María (San Martín, Meta, Colombia)	
Rapid Assessment of the Families and Groups of Trophic Birds Associated with Savannas and Gallery Forests at El Caduceo Nature Reserve, La María (San Martín, Meta, Colombia)	
<i>Luis Alejandro Yañez-Dukon, Nixon Fernando Vargas Hernández, Isabela Forero Espinosa, Pablo Locano Montoya y Jordan Steven Ruiz-Toquica</i>	132
<hr/>	
Instrucciones para autores	146

EDITORIAL

Vol. 11 (2) pp. 5-7, julio-diciembre del 2021

La variante delta del COVID-19: ¿qué podemos esperar?

La COVID-19 ha infectado y se ha diseminado por todo el planeta. Se han confirmado más de 221 millones de casos en todo el mundo, con más de 4,5 millones de muertes y un poco más de 2.000 millones de personas vacunadas con dosis completa y cerca de 1.000 millones con dosis parcial, marcando con ello un récord impresionante. Se estima que 40,6 % de la población mundial ha recibido por lo menos una dosis de la vacuna y que 5.500 millones de dosis han sido administradas. No obstante, la desigualdad es la norma en materia de vacunación, puesto que solo 1,9 % de los habitantes de países de bajos ingresos ha recibido al menos una dosis. En América, los países que tienen el mayor promedio de vacunación son Uruguay (166 dosis/100 habitantes), Chile (155 dosis/100 habitantes) y Canadá (142 dosis/100 habitantes). Por su parte, Estados Unidos reporta un cifra de 111 dosis/100 habitantes y Colombia 70 dosis/100 habitantes (Our World in Data). En varios países ya se habla de administrar una tercera dosis a todos las personas previamente vacunadas.

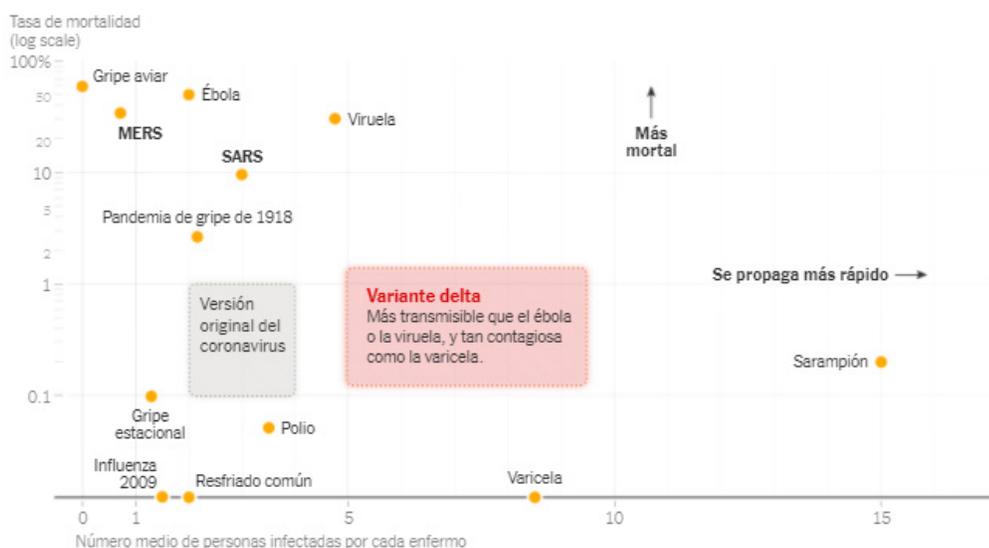
Actualmente, existen cuatro variantes del COVID-19 que generan gran preocupación y que fueron identificadas desde 2020: alfa, (Reino Unido), beta, (Sudáfrica), delta (India) y gamma (Brasil). Adicionalmente, otras siete variantes vienen siendo objeto de seguimiento debido a su capacidad infectiva y rápida proliferación.

Las variantes genéticas del COVID-19 se han estado produciendo e infectando a las poblaciones humanas durante toda la pandemia. La variante delta es la más contagiosa identificada hasta hoy, causando más infecciones y enfermedades graves que las primeras formas del virus. Esta variante es más del doble de contagiosa que las variantes anteriores y tan contagiosa como la varicela, se replica rápidamente y las personas portan grandes cantidades del virus en la nariz y la garganta. Sin embargo, al parecer, las vacunas son efectivas para prevenir la hospitalización y la muerte, incluso contra esta variante.

La propagación de la variante delta supercontagiosa ha producido nuevas restricciones en varios países y ha motivado estrictas recomendaciones por parte de las autoridades de salud pública. Por ejemplo, en algunos países ya se pide el carné de vacunación para entrar a restaurantes, cines o discotecas. En Australia la población se encuentra en confinamiento preventivo, Malasia ordenó a sus habitantes permanecer en casa, Irlanda retrasó los planes de volver al interior de los restaurantes y Hong Kong y Brasil restringieron los vuelos procedentes de Gran Bretaña, donde la variante delta se encuentra bastante extendida. Por su parte, Italia, Francia y otros países anunciaron que podrían exigir carné de vacunación para el acceso de las personas a recintos cerrados, todo esto promovido por dicha variante.

En cuanto a Colombia, el Ministerio de Salud nacional ha declarado que la variante delta se encuentra en el país desde hace algunos meses. Se conoce que la variante original del COVID-19 tuvo la capacidad para infectar a 2,2 personas en promedio y las variantes alfa y gama entre 4 y 5 personas. En cuanto a la delta, se estima que puede llegar a contagiar a 8 personas, como se observa en la figura 1. Esto todavía no se siente en Colombia, donde el promedio de infectados es cercano a 1.000 individuos por día. Por esta situación, se vive una “normalidad” aparente. Pero ¿qué nos espera?

Figura 1. Tasas medias de letalidad y números de transmisión.



Las estimaciones de las tasas de letalidad pueden variar y las cifras del coronavirus son estimaciones preliminares.

Fuente: Anthes (2021).

La variante delta tiene un período de incubación de cuatro días, en promedio (comparado con los seis de otras variantes). Además, la cantidad de virus en la persona infectada llega a ser mil veces mayor que con las otras variantes. Aunque al parecer las vacunas proporcionan protección contra la enfermedad grave, la hospitalización y la muerte, las personas vacunadas pueden infectarse con la variante delta y transmitirla a otras. ¡Es hora de reconocer la susceptibilidad en la que nos encontramos! Por esta razón, se recomienda el uso de tapabocas en recintos cerrados, en escuelas, colegios y universidades, así como el lavado de manos exhaustivo.

Esta variante puede evadir, en parte o parcialmente, los anticuerpos producidos por la vacunación o una previa infección. Al respecto, estudios previos reportaron que personas infectadas por la variante delta tenían aproximadamente el doble de probabilidades de ser hospitalizadas que aquellas infectadas por la variante alfa.

Adicionalmente, delta se ha dispersado en 182 países y actualmente es la variante más común en India y Reino Unido. En Estados Unidos delta fue identificada en marzo, y en abril representaba 0,1 % de los casos, en mayo el 1,3 % y en junio había aumentado a 9,5 %. Hoy, al parecer, alcanzó el 82,2 % del total de casos reportados en ese país (CDC).

De acuerdo con información del Ministerio de Salud de Colombia, la variante delta será predominante en octubre dentro del territorio nacional, por lo que es muy posible que se genere otro pico de infección, donde el incremento de contagios podría saturar servicios médicos y aumentar el número de hospitalizaciones y muertes.

De acuerdo con un estudio reciente, la vacuna de Pfizer tuvo una efectividad de 88 % en la protección contra la variante delta, contrastando su eficacia del 93 % contra la variante alfa. Por su parte, la vacuna de Johnson & Johnson tiene pruebas contradictorias. Sin embargo, el laboratorio fabricante ha indicado que esta tiene alta eficiencia contra la variante delta. ¿Y las otras vacunas? Aparentemente, las vacunas Moderna y AstraZeneca tienen buena protección. De las otras vacunas la información disponible es aún limitada. En Inglaterra, la efectividad de la vacuna Pfizer contra hospitalización fue de 96 %, mientras que AstraZeneca llegó a 92 %. Los datos reportados para Reino Unido señalan que el 97 % de las personas que terminan hospitalizadas o fallecen a causa de la COVID-19 no estaban vacunadas.

Como se observa, las personas totalmente inmunizadas también deben afrontar esta nueva fase de la epidemia, la protección de una sola dosis no es suficiente y, por supuesto, no estar vacunado es considerado de alto riesgo.

¿Qué se recomienda?: ¡vacunarse!

Javier Hernández Fernández

Editor Ciencias Biológicas – Revista Mutis

<https://orcid.org/0000-0001-8442-9266>

<https://doi.org/10.21789/22561498.1809>

REFERENCIAS

Anthes, E. (2021, agosto 16). La variante delta: lo que saben los científicos. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/es/2021/06/23/espanol/coronavirus-variante-delta.html>

Martínez-Delgado, M. (2021, agosto 16). Variante delta: su llegada a Colombia y la efectividad de las vacunas. *Pesquisa Javeriana*, 56. <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/variante-delta-su-llegada-a-colombia-y-la-efectividad-de-las-vacunas/>

Our World Data. (2021, septiembre 8). Coronavirus (covid-19) vaccinations. https://ourworldindata.org/covid-vaccinations?country=OWID_WRL

Simulación del proceso de producción de anhídrido maleico mediante el simulador ChemCAD®

Simulation of the Maleic Anhydride Production Process through ChemCAD® Simulator

Amaury Pérez Sánchez^{ac}, Elizabeth Ranero González^{ad}, Eddy Javier Pérez Sánchez^{be}

^a Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Camagüey, Cuba

^b Empresa Servicios Automotores S.A., Ciego de Ávila, Cuba

^c amaury.psanchez@reduc.edu.cu | <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>

^d <https://orcid.org/0000-0001-9755-0276>

^e <https://orcid.org/0000-0003-4481-1262>

RESUMEN

El anhídrido maleico es un producto químico con un amplio rango de aplicaciones como compuesto intermedio en la producción de resinas, polímeros, barnices y pinturas. En el siguiente trabajo se llevó a cabo la simulación del proceso de producción del anhídrido maleico a partir de la oxidación catalítica de benceno

mediante el simulador ChemCAD®, versión 5.2.0, con el fin de realizar los balances de masa de todas las corrientes de proceso, determinar el consumo de los servicios auxiliares en los intercambiadores de calor y conocer los parámetros de diseño más importantes del equipamiento empleado. Se llevaron a cabo dos estudios de sensibilidad: influencia de la temperatura y presión de operación del absorbedor sobre la cantidad a obtener de anhídrido maleico por la corriente del fondo de este equipo. Se obtienen 5.027,14 kg/h de anhídrido maleico por la corriente del tope de la columna de destilación con una pureza del 97,45 %. El absorbedor debe operar a una

Citation: Pérez-Sánchez, A., Ranero-González, E. y Pérez-Sánchez, E. D. (2021). Simulación del proceso de producción de anhídrido maleico mediante el simulador ChemCAD®. *Mutis*, 11(2), 8-21. <https://doi.org/10.21789/22561498.1752>

Recibido: 25 de agosto de 2020 **Aceptado:** 25 de marzo de 2021

Copyright: ©2021. Pérez-Sánchez, A., Ranero-González, E. y Pérez-Sánchez, E. D. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.



temperatura cercana a 20 °C y una presión de 5 bar para reducir las pérdidas de anhídrido maleico e incrementar las ganancias económicas del proceso.

Palabras claves: anhídrido maleico, benceno, ChemCAD®, estudio de sensibilidad, simulación.

ABSTRACT

Maleic anhydride is a chemical product with a wide range of applications in the production of resins, polymers, varnishes, and paints. This work presents a simulation of the maleic anhydride production process from the catalytic oxidation of benzene carried out in ChemCAD® simulator, version 5.2.0, in order to perform the mass balances of all the process streams, determine the consumption of utilities in the heat exchangers, and establish the most important design parameters of the equipment used. Two sensitivity studies were carried out: influence of the operating temperature and pressure of the absorber on the amount of maleic anhydride to be obtained in the bottom stream of this equipment. Around 5,027.14 kg/h of maleic anhydride were obtained on the top stream of the distillation column, with a purity of 97.45%. Based on our findings, the absorber must operate at a temperature near 20 °C and a pressure of 5 bar to reduce losses of maleic anhydride and increase the economic profits of the production process.

Keywords: Maleic anhydride, benzene, ChemCAD®, sensitivity study, simulation.

INTRODUCCIÓN

La oxidación de compuestos orgánicos como el benceno en fase de vapor es una reacción valiosa desde el punto de vista industrial debido a que los productos obtenidos, tales como el anhídrido maleico (AM) y el anhídrido ftálico, son intermediarios importantes (Uraz & Atalay, 2007).

El AM es un compuesto químico empleado para producir resinas, recubrimientos superficiales, aditivos de lubricantes y de alimentos, pinturas, barnices y sustancias químicas para la agricultura (Speight, 2002). Este se obtiene industrialmente mediante la oxidación de hidrocarburos específicos en fase gaseosa. El benceno resultó ser la materia prima predominante para la obtención de AM (Uraz & Atalay, 2007, 2012), aunque posteriormente la oxidación catalítica de hidrocarburos C-4 (fundamentalmente butano) ganó en importancia (Fernández *et al.*, 2010; Pugsley *et al.*, 1992; Tandioy *et al.*, 2009).

La tecnología del reactor empleado en el proceso de producción del anhídrido maleico involucra tanto las configuraciones de lecho fijo como fluidizado, aunque también se ha desarrollado la tecnología de lecho fluidizado circulante. Para la oxidación selectiva del benceno, la tecnología del proceso involucra la

configuración de lecho fijo, donde la reacción ocurre en fase gaseosa a 400-450 °C en un reactor de flujo en pistón multitubular. El catalizador, esencialmente un óxido mixto de vanadio/molibdeno (V/Mo) es depositado en un soporte inerte y altamente conductivo para permitir una mejor remoción del calor, el cual proviene de la reacción selectiva y también de las reacciones indeseables (combustión total del benceno y los productos). Bajo estas condiciones, la conversión del benceno es casi total (cerca de 96 %) y la selectividad del AM puede alcanzar el 73 % (Nosakhare *et al.*, 2017).

La propagación del uso de los computadores y ordenadores digitales ha impulsado el desarrollo de una gran variedad de herramientas para la solución de problemas de ingeniería y aquellos propios de las etapas iniciales del desarrollo de procesos químicos. En los últimos años, las técnicas de simulación se han afianzado lo suficiente, provocando que su uso se haya extendido a diversos campos de la ciencia y la técnica. Básicamente, la simulación es el estudio de un sistema a través de un modelo, el cual, en cualquier dominio de la ciencia, es el resultado logrado por el especialista al establecer las complejas conexiones entre un objeto de estudio del mundo real y una representación conceptual de ese objeto, esto es, el modelo (Rabelo, 2016).

En la actualidad, el empleo de la simulación de procesos químicos ha ganado en importancia gracias a que se trata de una actividad confiable, económica y que demanda menor tiempo para la obtención del modelo representativo del sistema bajo estudio. La simulación facilita el estudio de la influencia de diferentes parámetros de entrada sobre cualquier proceso químico, ayudando a comprender el rango de variables a partir del cual el proceso funciona adecuadamente, entregando así los mejores resultados en términos de cantidad y calidad (Greeshma *et al.*, 2014).

Entre los simuladores más utilizados en la actualidad se encuentra el ChemCAD®, el cual ha sido empleado para simular diferentes procesos productivos, entre los que se encuentran la fabricación de acetaldehído (Eliasson, 2010), biodiésel (Chilev & Simeonov, 2014), ácido monocloroacético (Greeshma *et al.*, 2014), epíclorohidrina (Almena & Martín, 2016), estireno (Pérez *et al.*, 2017) y ácido acrílico (Pérez *et al.*, 2019), así como la deshidratación de propanol (Wyczesany, 2017).

En el presente trabajo se lleva a cabo la simulación del proceso de producción de AM a partir de la oxidación parcial catalítica del benceno, empleando para ello el simulador de procesos ChemCAD® versión 5.2.0, con el objetivo de conocer la composición másica de cada una de las corrientes intermedias y finales del proceso de producción, determinar los principales parámetros de diseño de los equipos involucrados en el proceso y conocer el caudal másico de los servicios auxiliares consumidos en los intercambiadores de calor. Se efectuaron además dos estudios de sensibilidad en los cuales se evaluará la influencia del incremento tanto de la temperatura como de la presión de operación del absorbedor sobre la cantidad de AM a obtener por la corriente del fondo de este equipo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Propiedades del anhídrido maleico

El AM se presenta en forma de hojuelas cristalinas incoloras o blancas con un olor acre (pungente). Este es un compuesto químico tóxico e irritante a la piel y las membranas mucosas, que conduce a la ocurrencia

de quemaduras y ulceraciones. La tabla 1 muestra las propiedades químico-físicas más importantes del AM.

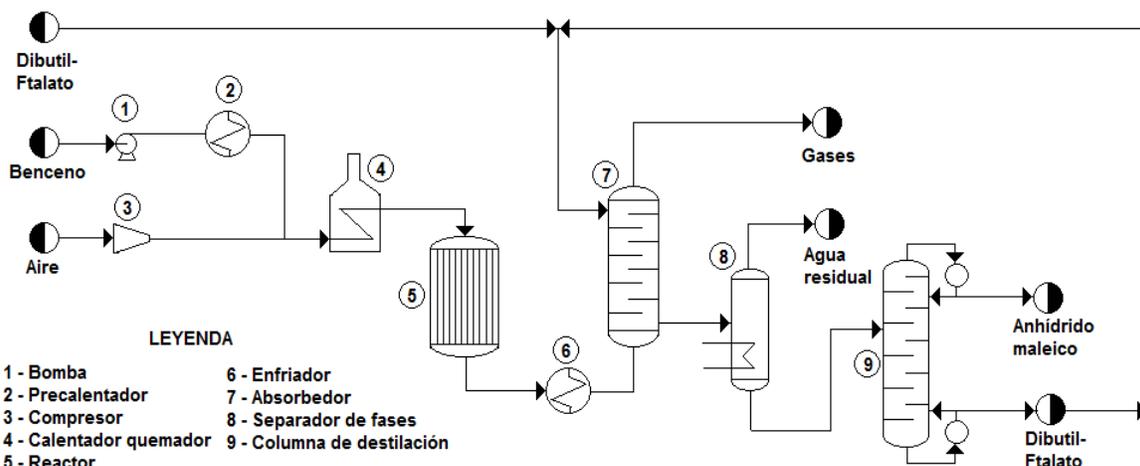
Tabla 1. Propiedades químico-físicas más importantes del AM

Propiedad	Valor
Fórmula molecular	C ₄ H ₂ O ₃
Masa molar	98,06 g/mol
Apariencia	Cristales blancos
Densidad	1,48 kg/L
Punto de fusión	52,85 °C
Punto de ebullición	202 °C
Calor específico (sólido)	0,285 kcal/kg °C
Calor específico (líquido)	0,396 kcal/kg °C
Calor de formación (a partir de benceno)	- 1.875,0 kJ/mol
Calor de combustión	- 1.390,0 kJ/mol
Calor de vaporización	54,8 kJ/mol
Calor de fusión	13,66 KJ/mol
Calor de hidrólisis	34,9 kJ/mol

Fuente: elaboración propia con base en Kirk *et al.* (2004) y Nosakhare *et al.* (2017).

Descripción del proceso de producción del anhídrido maleico a partir de benceno

La figura 1 muestra un diagrama de flujo con las principales etapas involucradas en el proceso de producción de AM. Para la elaboración y el diseño del proceso de producción que a continuación se describe, se empleó información publicada por Nosakhare *et al.* (2017) y Turton *et al.* (2018).

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de anhídrido maleico a partir de benceno

Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, se bombean 4.435,87 kg/h de benceno hacia un intercambiador de calor de tubo y coraza (precalentador) por medio de una bomba centrífuga, donde ocurre su calentamiento hasta 120 °C empleando vapor de agua saturado a 135 °C como agente de calentamiento. Por otro lado, se comprime aire seco atmosférico hasta 3 bar de presión por medio de un compresor centrífugo. Posteriormente, la corriente de benceno precalentada es mezclada con la corriente de aire comprimido con una relación másica aire/benceno de 18,2:1. La mezcla resultante benceno/aire es enviada luego hacia un calentador quemador, donde se calienta hasta 371 °C, ocurriendo la vaporización total del benceno. El benceno vaporizado y el aire seco caliente son enviados a continuación hacia un reactor catalítico de lecho empacado, donde reaccionan en presencia de un catalizador colocado en tubos de 25 mm de diámetro y 3,2 m de largo, formando una mezcla gaseosa que contiene fundamentalmente AM, agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂).

La temperatura de reacción promedio es de 380 °C y esta debe ser controlada en el rango de 350-400 °C. Debido a que la reacción es de tipo exotérmica, se hace circular sal fundida (una mezcla de nitrito de sodio y nitrato de sodio) por la chaqueta del reactor para mantener la temperatura de reacción en el valor establecido. En el reactor se obtiene una tasa de conversión benceno/anhídrido maleico de 93,2 %. Los gases de reacción obtenidos a la salida del reactor, que

contienen además oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂), benceno y quinona, provenientes de las reacciones secundarias, abandonan el reactor y son enfriados hasta 54 °C en un intercambiador de calor de tubo y coraza (enfriador) que emplea agua de enfriamiento a 30 °C, recuperándose en estado líquido el 100 % del AM alimentado.

El efluente obtenido a la salida del enfriador es enviado hacia una columna de absorción (absorbedor) donde establece contacto con el solvente dibutil-ftalato (DF), recuperándose de esta manera alrededor de 99,4 % del AM administrado. En el absorbedor se emplean 800 kg/h del solvente DF fresco, el cual se une al reciclo que se obtiene por el fondo de la columna de destilación, que contiene DF con un 99,9 % de pureza. Este equipo opera a una temperatura y presión promedios de 42 °C y 4 bar, respectivamente. La corriente que sale por el tope del absorbedor, rica en gases incondensables (CO₂, O₂ y N₂), es venteada hacia la atmósfera, por lo que se recomienda efectuar un estudio posterior que involucre la implementación de operaciones unitarias para purificar y recuperar el CO₂ que sale por esta corriente. De otro lado, la corriente que sale por el fondo del absorbedor, que contiene fundamentalmente AM, DF y agua, es enviada hacia un separador de fases para eliminar hasta un 95 % del agua que se alimenta, así como también la totalidad del benceno y cerca de 85 % de la quinona. La mezcla obtenida por el fondo del separador de fases se

enviada hacia una columna de destilación de platos, la cual opera a 1 atm de presión, mientras que la corriente del tope es enviada hacia la planta de tratamiento de residuales.

Alrededor del 99,9 % del DF alimentado a la columna de destilación es recuperado por la corriente de fondo de este equipo. Este DF recuperado recircula de nuevo al absorbedor con una pureza cercana al 99,9 %. El producto del tope de la columna de destilación, que se encuentra en estado líquido, contiene AM con 97,5 % de pureza, siendo el agua y la quinona las principales impurezas encontradas.

Catalizador

El catalizador empleado contiene entre 70 y 75 % de pentóxido de vanadio (V_2O_5) y entre 25 y 30 % de trióxido de molibdeno (MoO_3) colocado sobre un soporte inerte. El diámetro de los gránulos es de 5 mm y la temperatura máxima a la cual puede estar expuesto el catalizador sin que ocurra daño irreversible (sinterización) es de 650 °C. La tabla 2 muestra las propiedades físicas del catalizador empleado.

Tabla 2. Propiedades físicas del catalizador utilizado

Propiedad	Valor
Esfericidad de la partícula (adimensional)	0,80
Densidad del sólido (kg/m ³)	2.500
Densidad a granel (kg/m ³)	1.250
Capacidad calórica del sólido (kJ/kg °C)	250
Fracción hueca del lecho (adimensional)	0,50

Fuente: elaboración propia con base en Nosakhare *et al.* (2017).

Reacciones químicas y velocidad de reacción

La tabla 3 muestra las diferentes reacciones químicas que ocurren en el reactor, así como la expresión del coeficiente cinético de la reacción (Turton *et al.*, 2018), la extensión considerada y el calor de reacción (Kirk *et al.*, 2004).

Tabla 3. Reacciones químicas que ocurren en el reactor, con su cinética de reacción y extensión

Reacción y cinética	Ec.	Extensión	Calor de reacción (kJ/mol)
Formación de AM			
$C_6H_6(g) + 4,5O_2(g) \xrightarrow{k_1} C_4H_2O_3(g) + 2CO_2(g) + 2H_2O(g)$ $k_1 = 7,7 \times 10^6 \exp(-25143 / RT)$	(1)	93,20 %	- 1875,0
Combustión del benceno			
$C_6H_6(g) + 7,5O_2(g) \xrightarrow{k_2} 6CO_2(g) + 3H_2O(g)$ $k_2 = 6,31 \times 10^7 \exp(-29850 / RT)$	(2)	3,35 %	- 3267,6
Combustión del AM			
$C_4H_2O_3(g) + 3O_2(g) \xrightarrow{k_3} 4CO_2(g) + H_2O(g)$ $k_3 = 2,33 \times 10^4 \exp(-21429 / RT)$	(3)	30,00 %	- 1390,0
Formación de quinona			
$C_6H_6(g) + 1,5O_2(g) \xrightarrow{k_4} C_6H_4O_2(g) + H_2O(g)$ $k_4 = 7,20 \times 10^5 \exp(-27149 / RT)$	(4)	1,66 %	- 122,9

Fuente: elaboración propia con base en Kirk *et al.* (2004) y Turton *et al.* (2018).

Las unidades de la velocidad de reacción (r_i) son $\text{kmol}/\text{m}^3(\text{reactor})\cdot\text{s}$, la energía de activación está dada en kcal/kmol , las unidades de k_i son $\text{m}^3(\text{gas})/\text{m}^3(\text{reactor})\cdot\text{s}$ y las unidades de concentración corresponden a $\text{kmol}/\text{m}^3(\text{gas})$.

Equipamiento principal utilizado en el proceso de producción y sus funciones

Bomba centrífuga

Se emplea para incrementar la presión del benceno líquido desde la presión atmosférica hasta la presión de reacción (3 bar), para así tomar en cuenta la caída de presión dentro del recipiente de reacción. Si la presión de alimentación del benceno al reactor se encuentra por debajo de la presión atmosférica, la caída de presión dentro del reactor puede ocasionar contracción y conducir a eventos catastróficos. Este equipo presenta una eficiencia de 65 % (Turton *et al.*, 2018).

Compresor

Se usa para incrementar la presión del aire de alimentación hasta la presión del reactor especificada (3 bar). El equipo empleado es un compresor centrífugo con una eficiencia adiabática de 80 %.

Pre calentador

Se emplea para precalentar la corriente de benceno desde 30 hasta 120 °C, utilizando vapor de agua como agente de calentamiento. Es un intercambiador de calor de tubo y coraza del tipo TEMA BEM con un área total de intercambio de calor de 130 m^2 (TEMA, 1999). Se consideró un coeficiente global de transferencia de calor de 750 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ (Cao, 2010).

Calentador quemador

La mezcla benceno/aire es calentada hasta 371 °C por medio de un calentador quemador, el cual consume gas natural como combustible para efectuar el calentamiento. El equipo empleado registra una eficiencia de 80 %.

Reactor

En este equipo se llevan a cabo las reacciones (1)-(4). Se escoge una configuración del reactor de lecho empacado del tipo isotérmico.

Enfriador

Se emplea para enfriar la mezcla gaseosa de salida del reactor desde ~ 380 °C hasta 54 °C, para ello agua de enfriamiento a una temperatura de entrada de 30 °C. El simulador ChemCAD® calculará la cantidad de agua de enfriamiento necesaria para cumplir con este servicio. La temperatura de salida del agua de enfriamiento en el enfriador no deberá superar 50 °C. Es un intercambiador de calor de tubo y coraza del tipo TEMA AES con un área total de intercambio de calor de 280 m^2 (TEMA, 1999). Se consideró un coeficiente global de transferencia de calor de 400 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ (Cao, 2010).

Absorbedor

Este equipo es una columna de platos perforados que opera a 4 bar y 42 °C, y es donde se lleva a cabo la absorción del AM alimentado empleando DF como solvente. La corriente rica en AM es alimentada por el fondo, mientras que la corriente de DF entra por el tope del equipo. El simulador ChemCAD® determinará la cantidad total de etapas o platos necesaria para llevar a cabo la operación de absorción.

Separador de fases

Se utiliza para separar fundamentalmente el componente agua de los demás compuestos químicos presentes en la corriente de salida del absorbedor.

Columna de destilación

Es una columna de platos que opera a 1 atm de presión, y es donde ocurre la separación final del AM del solvente DF. El simulador ChemCAD® determinará la cantidad de platos o etapas que necesita este equipo para cumplir con la demanda del proceso de destilación.

Selección del modelo termodinámico

Se escogió el modelo termodinámico UNIFAC con asociación en fase de vapor para llevar a cabo la simulación en el simulador ChemCAD®. Este modelo se ajusta adecuadamente a los intervalos de presión y temperatura manejados en el proceso, así como también a los tipos de sustancias utilizados, según recomendación realizada por el propio simulador a partir del empleo de la opción “*K-Value Wizard*” contenida en el software.

Estudio de sensibilidad

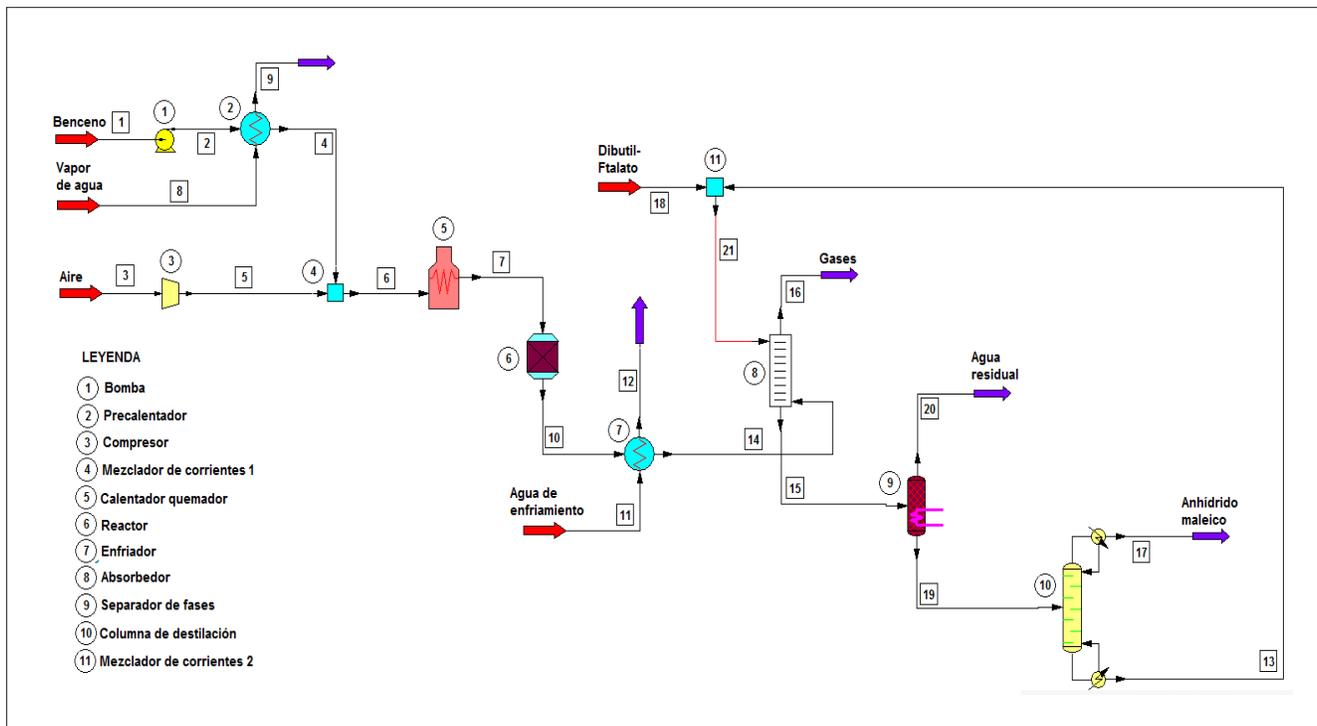
Se efectuaron dos estudios de sensibilidad utilizando la opción “Sensitivity Study” contenida en el simulador ChemCAD®. En el primero de ellos se evaluó la influencia que presenta un incremento de la temperatura de operación de la columna de absorción (absorbedor) sobre la cantidad de AM a obtener por la corriente del fondo de este equipo, a partir de la aplicación de un rango de temperatura que osciló entre 30-100 °C y manteniendo constante la presión de este equipo en un valor de 4 bar. En el segundo estudio se valoró la influencia que presenta un incremento de la presión de operación del absorbedor sobre el flujo másico a obtener de AM por la corriente del fondo, mediante la variación de este parámetro entre 1-10

bar y manteniendo constante la temperatura de operación en 42 °C. Además, se determinó el impacto económico de ambos estudios de sensibilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos durante la simulación del proceso de producción de AM con respecto a los balances de masa en cada una de las corrientes principales, los parámetros de rendimiento de los equipos, las curvas de calor de los intercambiadores de calor y los estudios de sensibilidad efectuados. La figura 2 muestra el diagrama de flujo del proceso de producción obtenido mediante el simulador ChemCAD®.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de AM a partir de benceno obtenido en el simulador ChemCAD®



Fuente: elaboración propia.

Corrientes de proceso

La tabla 4 expone la cantidad manejada de cada compuesto químico, así como la temperatura, presión y fracción de vapor de cada corriente de proceso.

Tabla 4. Resultados obtenidos de las principales corrientes de proceso

Variable	Número de la corriente (ver figura 2)					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	30	30,16	30	120	170	169,21
Presión (bar)	1	3	1	2,8	3	3
Fracción de vapor	0	0	1	1	1	1
Compuesto	Caudal (kg/h)					
Benceno	4.436	4.436	-	4.436	-	4.436
DF	-	-	-	-	-	-
Dióxido de carbono	-	-	-	-	-	-
Agua	-	-	-	-	-	-
AM	-	-	-	-	-	-
Oxígeno	-	-	16.963,97	-	16.963,97	16.963,97
Quinona	-	-	-	-	-	-
Nitrógeno	-	-	63.816,83	-	63.816,83	63.816,83
Total	4.436	4.436	80.780,80	4.436	80.780,80	85.216,80

Variable	Número de la corriente (ver figura 2)					
	7	10	14	21	15	16
Temperatura (°C)	380	380	54	320,30	42	42
Presión (bar)	3	2,8	2,8	5	4	4
Fracción de vapor	1	1	0,32	0	0	1
Compuesto	Caudal (kg/h)					
Benceno	4.436	79,40	79,40	-	18,89	60,51
DF	-	-	-	7.907,50	7.905,14	2,36
Dióxido de carbono	-	5.161	5.161	-	0,24	5.160,76
Agua	-	2.026,76	2.026,76	-	1.415,99	610,77
AM	-	5.189,93	5.189,93	4,90	5.161,91	32,92
Oxígeno	16.963,97	8.840,98	8.840,98	-	0,05	8.840,93
Quinona	-	101,90	101,90	0,01	100,64	1,27
Nitrógeno	63.816,83	63.816,83	63.816,83	-	0,11	63.816,72
Total	85.216,80	85.216,80	85.216,80	7.912,41	14.602,97	78.526,24

Variable	Número de la corriente (referirse a la Figura 2)				
	19	20	17	13	18
Temperatura (°C)	60	70	204,21	342,32	30
Presión (bar)	1	1	1	1,1	4
Fracción de vapor	0	0	0	0	0
Compuesto	Caudal (kg/h)				
Benceno	-	18,89	-	-	-
DF	7.114,62	790,51	7,11	7.107,51	800
Dióxido de carbono	-	0,24	-	-	-
Agua	70,80	1.345,20	70,80	-	-
AM	4.903,82	258,09	4.898,92	4,90	-
Oxígeno	-	0,05	-	-	-
Quinona	50,32	50,32	50,31	0,01	-
Nitrógeno	-	0,11	-	-	-
Total	12.139,56	2.463,41	5.027,14	7.112,42	800

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 4, la corriente de salida del reactor (corriente número 10 en la figura 2) contiene alrededor de 6,09 % de AM, siendo los principales compuestos encontrados en esta corriente el nitrógeno y el oxígeno (74,88 y 10,37 %, respectivamente). Cerca de 98,21 % del benceno alimentado al reactor se convirtió en productos, quedando sin reaccionar 79,40 kg/h de este compuesto, el cual compone cerca de 0,09 % de la corriente de salida del reactor.

En el absorbedor se remueven los compuestos oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono por la corriente del tope de este equipo (n.º 16) con remoción de 99,99 % para cada uno, por lo que se considera que la remoción de los gases incondensables es eficiente. En ese sentido, resulta válido precisar que esta corriente del tope está compuesta por 6,57 % de dióxido de carbono, emitiéndose a la atmósfera un total de 5.160,76 kg/h de este compuesto gaseoso. Como se planteó anteriormente, se recomienda efectuar estudios de ingeniería para realizar operaciones de separación, purificación y recobrado del CO₂ emitido en esta corriente, con el fin de que sea comercializado como subproducto de valor económico agregado y además mitigar la emanación de gases de efecto invernadero a la atmósfera, así como incrementar la rentabilidad económica global del proceso productivo.

El agua, el benceno y la quinona se remueven en el absorbedor con las siguientes relaciones: 30,13 %, 76,21 % y 1,24 %, respectivamente, mientras que el AM es recuperado en un 99,37 % por el solvente DF, es decir, la pérdida de AM en este equipo es de solamente 0,63 % (32,82 kg/h). Por último, solo 0,03 % del DF alimentado al absorbedor se pierde por la corriente del

tope, por lo que se puede decir que este equipo opera adecuadamente.

En el separador de fases, se remueve por la corriente del tope (n.º 20) la totalidad del benceno, CO₂, N₂ y O₂, el 95 % del agua —que es el compuesto que se desea remover con mayor interés en esta etapa— y el 50 % de la quinona. Por otro lado, se pierden 790,51 kg/h de DF por la corriente del tope de este equipo, por lo tanto será necesario adicionar 800 kg/h de DF fresco en el absorbedor para compensar esta pérdida. El AM se remueve en un 5 %, lo que significa que el 95 % del AM alimentado al separador de fases (4.903,82 kg/h) se recupera por la corriente del fondo de este equipo y es enviado hacia la columna de destilación para su purificación final. Por ello, el separador de fases funciona eficientemente, sirviendo de etapa de purificación intermedia del proceso productivo.

Por último, la columna de destilación recupera los compuestos AM y DF en un 99,89 y 99,86 %, respectivamente, obteniéndose por la corriente del fondo (n.º 13) el solvente DF con una pureza de 99,93 %, mientras que el producto deseado (AM) se recupera por la corriente del tope de este equipo (n.º 17) con una pureza de 97,45 %, siendo el agua (1,41 %), la quinona (1 %) y el DF (0,14 %) las principales impurezas encontradas.

Parámetros de diseño de los equipos

La tabla 5 expone los principales parámetros de diseño y de operación determinados para cada uno de los equipos utilizados en el proceso, los cuales fueron calculados por el simulador ChemCAD®.

Tabla 5. Parámetros de diseño y operación de cada uno de los equipos empleados en el proceso de producción

Bomba centrífuga		
Parámetro	UM	Valor
Potencia calculada	kW	0,35
Carga	m	23,49
Caudal volumétrico	m ³ /h	5,11

Compresor		
Parámetro	UM	Valor
Cp/Cv ideal		1,39
Cp/Cv		1,40
Potencia teórica	kW	25,36
Potencia real	kW	31,71

Intercambiadores de calor			
Parámetro	UM	Precalentador	Enfriador
Carga de calor calculada	MJ/h	2.347,77	35.504,10
Media Logarítmica de la Diferencia de Temperatura (MLDT)	°C	46,20	125,06
Caudal de servicio auxiliar	kg/h	1094,92	21239,36

Calentador quemador		
Parámetro	UM	Valor
Calor absorbido	MJ/h	19.634,50

Reactor		
Parámetro	UM	Valor
Calor total de reacción	MJ/h	- 8.145,28

Absorbedor		
Parámetro	UM	Valor
Número total de etapas	-	14

Columna de destilación		
Parámetro	UM	Valor
Carga de calor en el condensador	MJ/h	- 4.622,24
Demanda de agua de enfriamiento en el condensador	kg/h	7.245
Carga de calor en el rehervidor	MJ/h	10.823,60
Demanda de vapor de agua en el rehervidor	kg/h	11.578
Etapas	-	15
Etapas de alimentación	-	11
Relación de reflujo calculada	-	1,35

Fuente: elaboración propia.

La tabla 5 muestra que la bomba a utilizar para bombear el benceno deberá tener una potencia de 0,35 kW y una carga de 23,49 m, así como un caudal de diseño de 5,11 m³/h.

La potencia real que deberá poseer el compresor es de 31,71 kW. En los intercambiadores de calor, el enfriador presenta un valor de carga de calor 15 veces superior al del precalentador, lo cual se debe a que en el enfriador se lleva a cabo una importante reducción de la temperatura de la mezcla gaseosa reaccionante de salida del reactor desde 380 °C hasta 54 °C (diferencia de 326 °C), que origina una gran liberación de calor por parte del material que está siendo enfriado. Además, en el enfriador se obtiene una media logarítmica de la diferencia de temperatura (MLDT) 2,7 veces superior en comparación con aquella calculada para el precalentador, lo cual se debe a los amplios límites de temperatura manejados en este intercambiador. Por otro lado, se necesitan 21.239,36 kg/h de agua de enfriamiento en el enfriador para hacer frente a la carga de calor requerida, mientras que resulta necesario utilizar 1.094,92 kg/h de vapor de agua por el precalentador para calentar la corriente de benceno desde 30 °C hasta 120 °C.

En el calentador quemador se absorben 19.634,50 MJ/h de calor por parte de la mezcla gaseosa benceno/aire con el fin de incrementar su temperatura desde 169 °C hasta 380 °C.

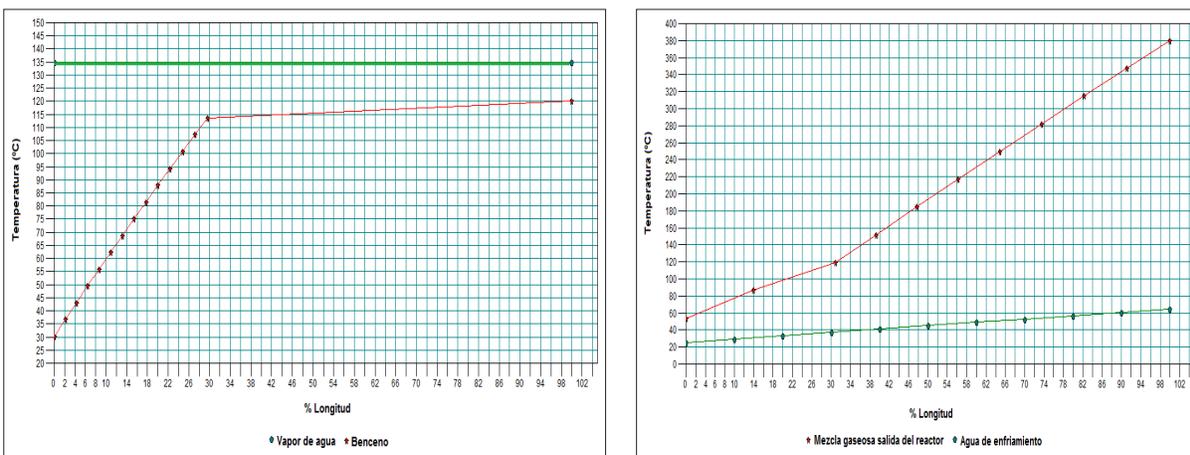
El calor de reacción total calculado para las cuatro reacciones químicas que ocurren en el reactor es de - 8.145,28 MJ/h, lo cual corrobora la afirmación de que las reacciones son exotérmicas.

El absorbedor necesita 14 etapas para efectuar su operación, mientras que la columna de destilación necesita 15 etapas, siendo la etapa de alimentación la número 11. La remoción de calor en el condensador es de - 4.622,24 MJ/h, mientras que la carga de calor en el rehervidor es de 10.823,6 MJ/h. Por último, se necesita una relación de reflujo calculada para esta columna de 1,35.

Curvas de calor

La figura 3 muestra las curvas de calor obtenidas mediante el simulador ChemCAD® para cada uno de los intercambiadores de calor empleados en el proceso de producción.

Figura 3. Curvas de calor obtenidas para los dos intercambiadores de calor empleados en el proceso: precalentador (izquierda) y enfriador (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Las curvas de calor obtenidas para el precalentador indican que el vapor de agua experimenta un cambio de fase a la temperatura de alimentación (135 °C), lo que significa que este servicio entra en condiciones saturadas a dicho intercambiador de calor. El benceno se calienta sin cambio de fase hasta los 115 °C y una longitud del intercambiador del 30 %, cambiando de fase y continuando el calentamiento según la tendencia lineal creciente que se observa en su curva de calor. A partir de este punto ocurre la vaporización de este compuesto hasta alcanzar la temperatura de salida deseada (120 °C), manifestándose mediante el cambio de patrón (punto de giro) obtenido para esta curva.

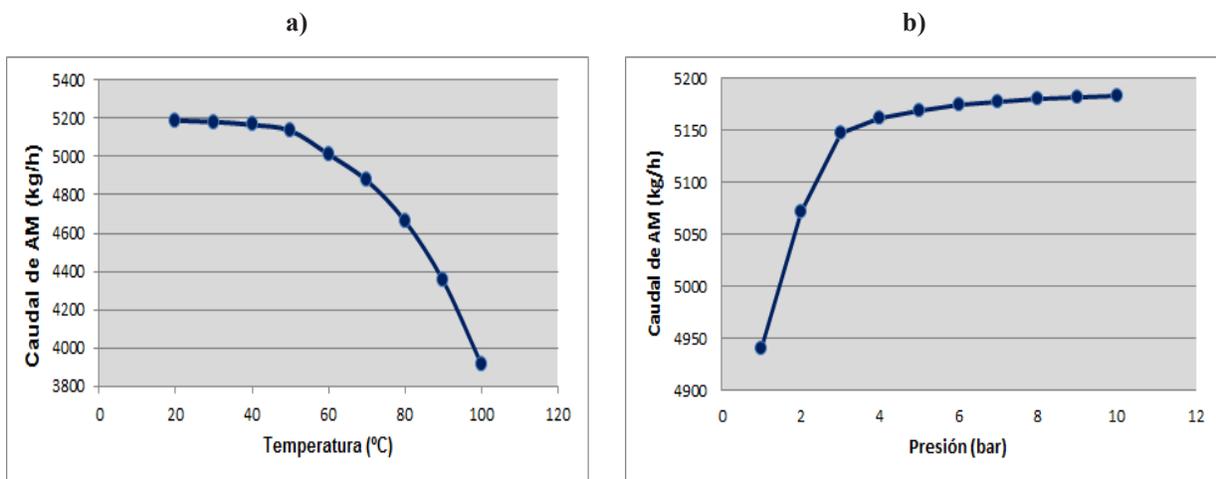
Finalmente, considerando las curvas de calor obtenidas para el enfriador, se deduce que la mezcla reaccionante tolera enfriamiento sin ocurrir cambio de fase hasta una temperatura de 120 °C y una longitud del intercambiador del 31 %, a partir de la cual ocurre cambio de fase de algunos de sus componentes hasta alcanzar la temperatura de salida deseada (54 °C), manifestado por medio del cambio de patrón observado en la curva obtenida. La curva de calor del agua de enfriamiento demuestra por su parte que solo absorbe calor sensible.

Estudios de sensibilidad

La figura 4 muestra los resultados obtenidos con respecto al estudio de sensibilidad efectuado. Según los resultados obtenidos en el estudio de sensibilidad n.º 1 (figura 4a), a medida que aumenta la temperatura de operación del absorbedor disminuye la cantidad a obtener de AM por la corriente del fondo, es decir, existe una mayor evaporación de este compuesto por la corriente del tope. Lo anterior se deduce a partir de la tendencia curvada decreciente observada, siendo evidente a partir de los 50 °C. Así, un incremento de la temperatura de operación desde 40 hasta 50 °C producirá pérdidas de AM de 30,93 kg/h, un incremento de 50 °C hasta 60 °C ocasionará que se pierdan 123,12 kg/h de AM y un aumento de 90 °C hasta 100 °C causará pérdidas de AM de 436,05 kg/h, es decir, la tendencia es ciertamente creciente a medida que aumenta la temperatura de operación del absorbedor.

En cuanto al estudio de sensibilidad n.º 2 (figura 4b), se deduce que un incremento de la presión de operación del absorbedor favorece una mayor obtención de AM por la corriente del fondo de este equipo. Según los resultados obtenidos, un incremento de la presión desde 1 bar hasta 5 bar ocasionará que se recuperen 229,26 kg/h de AM, mientras que un aumento desde 1 bar hasta 10 bar producirá que se recobren 242,91 kg/h.

Figura 4. Resultados del estudio de sensibilidad realizado



a) Temperatura de operación del absorbedor versus caudal de AM a obtener por la corriente de fondo de este equipo; b) presión de operación del absorbedor versus caudal de AM a obtener por la corriente de fondo de este equipo.

Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta que el costo unitario del AM en el mercado internacional se encuentra en el orden de USD 2,68/kg (ICIS, 2021), el incremento de la temperatura de operación en el absorbedor desde 20 °C hasta 100 °C provocará pérdidas estimadas de USD 3.412,02 debido a la evaporación (salida) de AM por la corriente del tope de este equipo. Por su parte, el incremento de la presión de operación en el absorbedor desde 1 bar hasta 5 bar posibilitará que se generen ganancias económicas adicionales de USD 614,42 a causa del incremento de la cantidad de AM obtenido por la corriente del fondo.

De esta manera, se recomienda operar el absorbedor a una temperatura cercana a 20 °C y una presión de 5 bar, con el fin de maximizar las cantidades a obtener de AM por la corriente del fondo de este equipo y, con ello, las ganancias económicas.

CONCLUSIONES

El empleo del simulador ChemCAD® permitió simular de forma eficiente el proceso de producción de anhídrido maleico a partir de la oxidación catalítica del benceno.

El precalentador necesita 1.094,92 kg/h de vapor de agua y el enfriador 21.239,36 kg/h de agua de enfriamiento para llevar a cabo sus operaciones térmicas.

Se obtienen 5.027,14 kg/h por la corriente del tope de la columna de destilación, conteniendo AM con una pureza de 97,45 %, siendo el agua la principal impureza encontrada con un 1,41 % del total, mientras que el AM recuperado de este compuesto en este equipo alcanzó 99,89 %.

El absorbedor debe operar a una temperatura cercana a 20 °C y una presión de 5 bar para maximizar la cantidad de AM a obtener por la corriente del fondo y, con ello, las ganancias económicas.

REFERENCIAS

- Almena, A., & Martín, M. (2016). Technoeconomic analysis of the production of epichlorohydrin from glycerol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55, 3226-3238. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02555>
- Cao, E. (2010). *Heat transfer in process engineering*. McGraw-Hill.
- Chilev, C., & Simeonov, E. (2014). Simulation of biodiesel production by transesterification of vegetable oils. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49(5), 479-486.
- Eliasson, J. (2010). *Design of a plant for manufacturing acetaldehyde*. Lund University.
- Fernández, J. R., Vega, A., & Díez, F. V. (2010). Partial oxidation of n-butane to maleic anhydride over VPO in a simulated circulating fluidized bed reactor. *Applied Catalysis A: General*, 376(1-2), 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.12.006>
- Greeshma, N., Shah, B. H., & Patel, N. M. (2014). Simulation study of reactive distillation for monochloroacetic acid using ChemCAD. *International Journal of Futuristic Trends in Engineering and Technology*, 1(2), 1-11.
- Independent Commodity Intelligence Services [ICIS]. (2021). *Global maleic anhydride market outlook*. <https://www.icis.com/explore/commodities/chemicals/maleic-anhydride/>
- Kirk, R. E., Othmer, D. F., Grayson, M., & Eckroth, D. (eds.) (2004). *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology* (cuarta ed., vols. 4, 15, 20). John Wiley & Sons.
- Nosakhare, F., Yakubu, A. M., & Onajite, R. O. (2017). *Design of a 40,000 tonnes capacity maleic anhydride production process using benzene as feedstock* (tesis de pregrado, Universidad de Benín). Universidad de Benín.

- Pérez, A., Pérez, E. J., & Segura, R. M. (2017). Simulation of the styrene production process via catalytic dehydrogenation of ethylbenzene using ChemCAD® process simulator. *Tecnura*, 21(53), 15-31. <https://doi.org/10.14483/22487638.11499>
- Pérez, A., Pérez, E. J., & Segura, R. M. (2019). Simulation of the acrylic acid production process through catalytic oxidation of gaseous propylene using ChemCAD® simulator. *Ingeniare*, 27(1), 142-150. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000100142>
- Pugsley, T. S., Patience, G. S., Berruti, F., & Chaouki, J. (1992). Modeling the catalytic oxidation of n-butane to maleic anhydride in a circulating fluidized bed reactor. *Ind Eng Chem Res.*, 31, 2652-2660. <https://doi.org/10.1021/ie00012a005>
- Rabelo, Y. (2016). *Simulación del proceso de producción de una fábrica de conservas de frutas y vegetales* (tesis de maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Speight, J. (2002). *Chemical and process design handbook*. McGraw-Hill.
- Tandioy, O. M., Gil, I. D., & Sanchez, O. F. (2009). Modeling of maleic anhydride production from a mixture of n-butane and butenes in fluidized bed reactor. *Latin American Applied Research*, 39, 19-26.
- Tubular Exchanger Manufacturers Association [TEMA]. (1999). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (octava ed.). TEMA.
- Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D., & Whiting, W. B. (2018). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (quinta ed.). Prentice Hall.
- Uraz, C., & Atalay, S. (2007). Oxidation of benzene to maleic anhydride in a fluidized bed reactor. *Chem Eng Technol.*, 30(12), 1708-1715. <https://doi.org/10.1002/ceat.200700249>
- Uraz, C., & Atalay, S. (2012). Comparison between the performances of a fluidized-bed reactor and a fixed-bed reactor for the oxidation of benzene to maleic anhydride. *Turkish J Eng Env Sci.*, 36, 59-71.
- Wyczesany, A. (2017). Simulation of n-propanol dehydration process via heterogeneous azeotropic distillation using the NRTL Equation. *Chemical and Process Engineering*, 38(1), 163-175. <https://doi.org/10.1515/cpe-2017-0013>

Variación del canto de *Myiothlypis fulvicauda* (Parulidae) en ambientes naturales de Ibagué (Tolima, Colombia)

Song Variation of *Myiothlypis fulvicauda* (Parulidae) in Natural Environments in the municipality of Ibagué (Tolima, Colombia)

Daniela Villamizar-Soto^{ab}, Edwin Orlando López-Delgado^{ac}, Sergio Losada-Prado^{ad}

^a Grupo de Investigación en Zoología (GIZ), Programa de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Colombia.

^b dvillamizar@ut.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-6272-638X>

^c <https://orcid.org/0000-0002-4010-1880>

^d <https://orcid.org/0000-0001-6916-3893>

RESUMEN

El canto de las aves es fundamental para la comunicación y el desarrollo de diferentes actividades. Por otra parte, el ruido que proviene de diversas fuentes dificulta su recepción, por lo cual algunas aves cambian la estructura, frecuencia, energía o el horario de su canto con el fin de asegurar ser escuchadas. Particularmente, el ruido generado por ríos es constante y tiene mayor intensidad a bajas frecuencias, por lo que puede enmascarar el canto. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue analizar el canto de *Myiothlypis fulvicauda* en ambientes con ruido natural generado por cuerpos de agua en el municipio de Ibagué (Tolima), teniendo en cuenta además la temporada climática y el grado de cobertura vegetal. Las grabaciones se realizaron en los meses de mayo, julio y octubre de 2019 en 8 localidades, estableciendo dos tratamientos de ruido: alto y bajo. Se emplearon modelos lineales generalizados, así como análisis de varianza y correlación, para evaluar el efecto del ruido, la temporada climática y el grado de cobertura vegetal sobre el canto de esta ave. Se encontró que la frecuencia máxima, el

rango de frecuencias y el número de silbidos iniciales fueron mayores en hábitats con ruido alto. A su vez, el rango de frecuencias fue menor durante la temporada seca. Por su parte, el número de elementos repetitivos y las frecuencias máximas también fueron menores en localidades con vegetación más densa. Estos cambios en el canto de *M. fulvicauda* denotan una posible adaptación de la especie como respuesta al ruido y a características de su hábitat tales como la cobertura vegetal y la temporada climática.

Palabras clave: bioacústica, adaptación acústica, vocalización, arañero ribereño, ruido.

Citation: Villamizar-Soto, D., López-Delgado, E. O. y Losada-Prado, S. (2021). Variación del canto de *Myiothlypis fulvicauda* (Parulidae) en ambientes naturales de Ibagué (Tolima, Colombia). *Mutis*, 11(2), 22-32. <https://doi.org/10.21789/22561498.1733>

Recibido: 6 de abril de 2021

Aceptado: 15 de mayo de 2021

Copyright: ©2021. Villamizar-Soto, D., López-Delgado, E. O. y Losada-Prado, S. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.



ABSTRACT

Bird songs are fundamental for the communication and development of different bird activities. On the other hand, the noise coming from various sources make it difficult to receive bird songs, and therefore some bird species have changed the structure, frequency, energy, or time of their singing to ensure they can be heard. Particularly, the noise generated by rivers is constant and has greater intensity at low frequencies, so it could mask birds' songs. Hence, the objective of this work was to examine the song of *Myiothlypis fulvicauda* in environments with natural noise generated by water bodies in the municipality of Ibagué (Tolima), considering the climatic season and the degree of vegetation cover within this analysis. Recordings were performed during May, July, and October 2019 at 8 locations, which were assigned two types of noise treatment: high and low. Generalized linear models and variance and correlation analysis were used to evaluate the effect of noise, climatic season, and vegetation cover degree on the singing of this species of bird. We found that the maximum frequency, frequency bandwidth, and number of initial whistles were higher in high-noise habitats, while the frequency bandwidth was lower during the dry season. Besides, the number of repetitive elements and maximum frequencies were lower in highly dense vegetation locations. These changes in the song of *M. fulvicauda* denote a possible adaptation of this species in response to environmental noise and habitat characteristics such as vegetation cover and season patterns.

Keywords: Bioacoustics, acoustic adaptation, vocalization, Buff-rumped Warbler, noise.

INTRODUCCIÓN

Las aves usan cantos y llamados para comunicarse, por lo que estas vocalizaciones cumplen funciones importantes como avisar sobre alimento y peligro, la defensa del territorio y atraer pareja, entre otras (Catchpole & Slater, 2008). Los cantos, por lo general, son largos, complejos y producidos por machos, aunque en el trópico es común que también los produzcan las hembras. Los llamados, en cambio, suelen ser cortos, simples y producidos por ambos sexos (Gill, 2007). Por ello, la correcta emisión y recepción del canto permite al macho tener mayor éxito reproductivo y defensa de su territorio. A su vez, las hembras podrán elegir al macho cuyo canto demuestre que este será capaz de brindar a su descendencia las mejores características para el lugar que habitan (Catchpole & Slater, 2008).

En la naturaleza existe una gran variedad de fuentes de ruido, entre las que se cuentan las cascadas y los ríos (abióticas), cuya energía sonora se concentra en las frecuencias más bajas y puede enmascarar el canto de las aves (Narins *et al.*, 2004). Otras fuentes de ruido que enmascaran el canto corresponden a fuentes bióticas como el canto de otras aves, debido a la similitud espectral y temporal de los sonidos entre algunas especies (Brumm, 2013). Así mismo, con la continua expansión urbana, los sonidos que produce el ser humano constituyen otra fuente de ruido (antropogénica) (Brumm, 2013; Pijanowski *et al.*, 2011). Por

otra parte, cuando el canto es emitido este se propaga a través de un medio, por lo que factores como el aire, el suelo y la vegetación pueden reducir su energía mediante absorción, o redirigirlo gracias a la reflexión o difracción tras chocar con algún elemento, de manera que estos fenómenos acústicos también pueden distorsionar el canto de las aves (Morton, 1975).

Los estudios existentes se han enfocado principalmente en evaluar el efecto del ruido antropogénico sobre el canto de las aves, encontrando pocas investigaciones que incluyan fuentes de ruido naturales, aun cuando, por ejemplo, los ríos generan ruido constante que podría ser una fuerza selectiva que module la evolución de señales acústicas como el canto (Vargas-Salinas *et al.*, 2014). Ciertos estudios han demostrado que en ambientes con altos niveles de ruido algunas aves no logran identificar a los invasores ni a su pareja (Swaddle & Page, 2007). Sin embargo, otras especies consiguen ser escuchadas a pesar del ruido gracias a la incorporación de cambios en la estructura de su canto, como incrementos en su frecuencia (Brumm & Slabbekoorn, 2005; Douglas & Conner, 1999; Slabbekoorn & Peet, 2003), intensidad (Brumm, 2004), complejidad o duración (Brumm & Slater, 2006). No obstante, estos cambios pueden afectar a los individuos, puesto que, en ocasiones, aunque el canto resulta más atractivo para las hembras, este puede ser menos efectivo para defender y mantener el territorio (Fernández-Juricic, 2005; Luther *et al.*, 2016).

Este trabajo tomó como objeto de estudio a la especie *Myiothlypis fulvicauda* (Parulidae), conocida como arañero ribereño, la cual se caracteriza por no presentar dimorfismo sexual, tener una coloración oliva pardusca, una rabadilla amarillenta brillante y en su parte inferior presentar una coloración blanca antecada a blanquecina (Hilty & Brown, 2001). La especie está asociada a cuerpos de agua y suele verse en grupos de dos a tres individuos, en los que solo uno (aparentemente el macho) canta activamente durante todo el año (Escalante, 2013; Sánchez-Guzmán & Losada-Prado, 2016).

Teniendo en cuenta lo expuesto, el objetivo de esta investigación fue analizar los posibles cambios en el canto de *Myiothlypis fulvicauda* como respuesta a la temporada climática, la cobertura vegetal y el ruido producido por quebradas en el municipio de Ibagué (Tolima, Colombia). Se espera que en ambientes con alto nivel de ruido el canto presente una frecuencia más alta, lo que se considera debe ocurrir en temporada lluviosa, cuando el ruido aumenta por el incremento de los caudales. Así mismo, se espera que en ambientes con mayor cobertura vegetal se presente un menor número de notas en el canto.

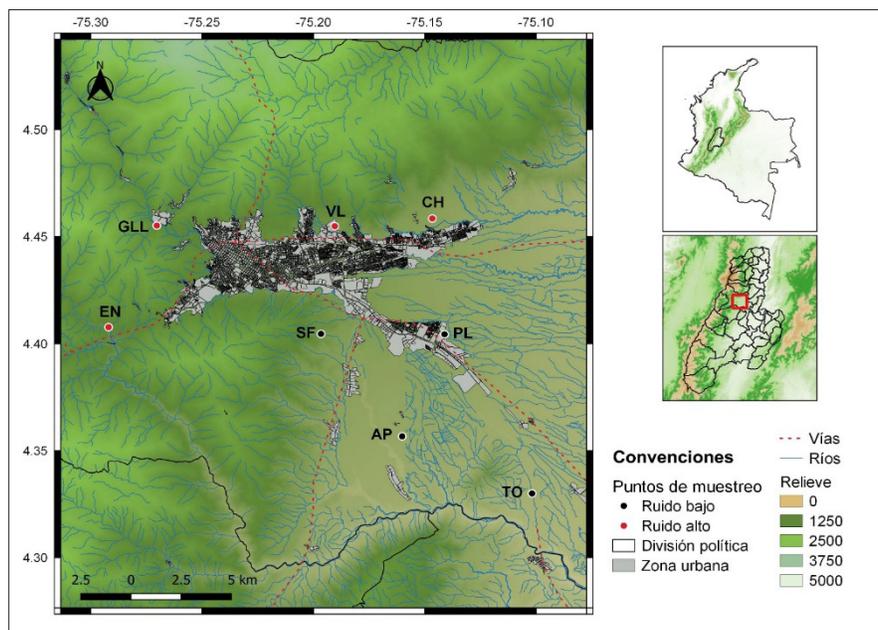
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Ibagué (Tolima) está ubicado en la vertiente oriental de la Cordillera Central de Colombia, en su confluencia con el valle del Río Magdalena. Allí se encuentran paisajes de montaña con altas pendientes y la planicie conocida como meseta de Ibagué (SPT, 2014). Este municipio está localizado a 1.285 m de elevación y una temperatura promedio de 21 °C (SPT, 2014).

En esta zona se muestrearon ocho localidades en los alrededores del casco urbano (figura 1), en las que se evidenció la presencia de ríos, quebradas, canales de riego y aguas con corriente imperceptible, los cuales generan ruido de diferente intensidad. Estas localidades comprendieron dos zonas de vida, bosque seco tropical (Bs-T) y bosque húmedo premontano (Bh-PM) (Holdridge, 1967), y se caracterizan por ser áreas con poca intervención humana, alta presencia arbustiva y relictos de bosque secundario. Las localidades estudiadas fueron agrupadas de acuerdo con dos niveles de ruido: alto (> 65 dB) y bajo (< 65 dB).

Figura 1. Localidades estudiadas en el municipio de Ibagué (Tolima)



Río Coello (EN), Quebrada El Gallo (GLL), Quebrada Las Panelas (VL), Quebrada Chembe (CH), Quebrada Reserva Natural Santa Fe de los Guadales (SF), Quebrada Aparco (AP), Canal de riego Hacienda el Escobal (PL) y Laguna el Toro (TO).

Recolección de datos

Cada localidad fue visitada durante las temporadas lluviosa (mayo y octubre) y seca (julio) de 2019. Debido a que en el mes de mayo no fue posible obtener las grabaciones requeridas en todas las localidades, los puntos restantes fueron visitados en octubre. Las grabaciones fueron realizadas por un solo investigador entre las 06:00 y 11:00 horas, para lo cual se hicieron recorridos paralelos a los cuerpos de agua, donde se grabaron los cantos de *M. fulvicauda*, procurando tener a la vista del observador al individuo emisor. Una vez grabado un individuo, el desplazamiento se hizo en dirección opuesta a la que este siguió para evitar grabarlo nuevamente. Para esta actividad se utilizó una grabadora Marantz PMD661, un micrófono omnidireccional Sennheiser ME-62 y una antena parabólica Sennheiser, configurada a una tasa de muestreo de 44.100 Hz y codificación de 16 bits.

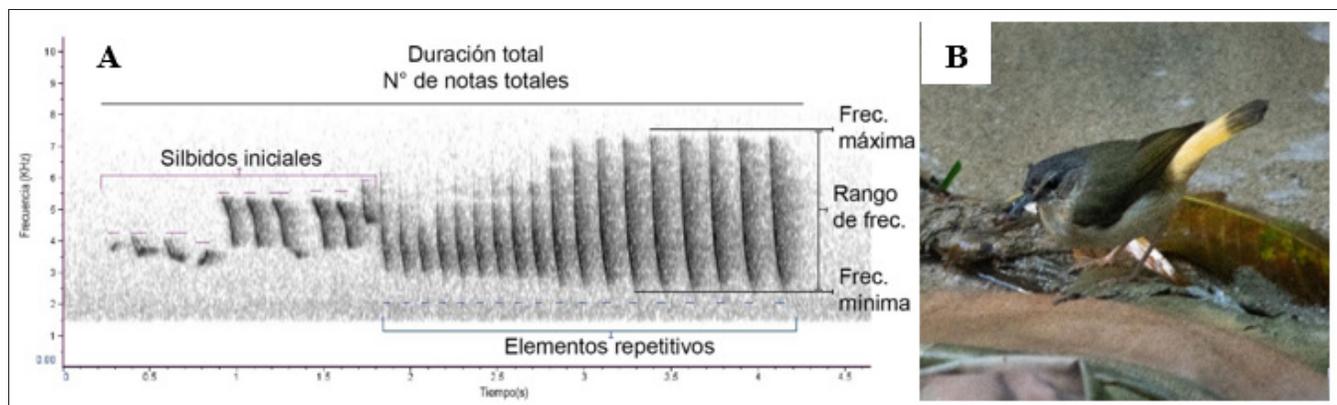
Para el ruido se tuvieron en cuenta las diferentes caídas de agua, tomando mediciones durante dos horas (06:00h – 08:00 h) para obtener el nivel de presión sonora continuo equivalente (L_{Aeq}), empleando un sonómetro Extech 407730 con una ponderación de frecuencia A y una respuesta rápida (Londoño & Fernández, 2011). Además, se obtuvo el grado de cobertura vegetal de cada localidad, el cual se refiere al espacio ocupado por las plantas (Melo & Vargas, 2002). Para ello, se elaboraron tres parcelas de 10 x 20

m perpendiculares a los cuerpos de agua y se tuvieron en cuenta todas las plantas con diámetro a la altura del pecho igual o superior a 3 cm (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2003).

Análisis de datos

Se realizaron cortes de las grabaciones y se generaron espectrogramas en el software Raven Pro 1.5, en los que se configuró un tamaño de transformación de 512 y un tipo de ventana Hann (CCB, 2014). En todas las localidades se grabaron dos individuos, excepto en AP, donde se realizó la grabación de tres individuos. De cada individuo se tomó el primer y último canto de la grabación con mejor calidad. Se analizaron las dos partes del canto, es decir, los silbidos iniciales (SI) —con menor rango de frecuencias— y los elementos repetitivos (ER) —notas similares de corta duración (forman un trino) con mayor rango de frecuencias y amplitud hacia el final del canto— (Escalante, 2013). De estas partes se midió el número de notas totales (N_notas), número de SI (N_SI) y la duración de cada uno (D_SI), duración total del canto (D_total), velocidad de ER (Rate), frecuencia mínima y máxima de cada nota y del canto (F_min, F_max), rango de frecuencias (F_rango) y frecuencia central (F_central), obteniendo un total de 118 variables correspondientes a cada medición (figura 2). Las variables de frecuencia se obtuvieron en Hertz (Hz) y el tiempo en segundos (s).

Figura 2. Especie objeto de estudio: **A.** Estructura del canto de *Myiothlypis fulvicauda*; **B.** Adulto de *M. fulvicauda*



Fuente: elaboración propia. Fotografía: Daniela Villamizar-Soto.

Para identificar diferencias en las variables del canto en los tratamientos de ruido y temporadas climáticas, se utilizó un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis, debido a que las variables no cumplieron con los supuestos paramétricos (normalidad y homogeneidad de varianza) esperados. El análisis de varianza se complementó con gráficos exploratorios de cajas y bigotes, en los cuales se representaron las variables generales del canto. Para identificar posibles relaciones entre la cobertura vegetal y las variables del canto, se empleó un análisis de correlación de Spearman.

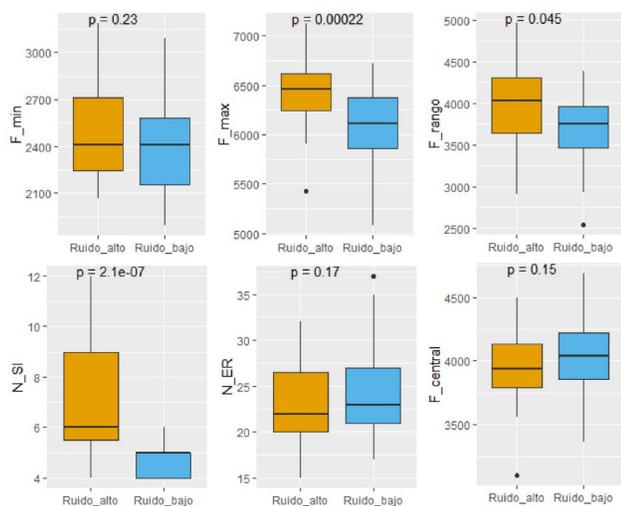
Con el fin de realizar análisis multivariados, se evaluó la multicolinealidad de las variables del canto con un análisis de correlación de Spearman, eliminando aquellas variables con alta correlación (> 70 %). Posteriormente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con el objetivo de seleccionar las variables de mayor contribución a ser utilizadas en los modelos lineales generalizados (GLM). Para los GLM se incluyeron como variables dependientes el rango de frecuencias del canto (F_rango), la frecuencia mínima del segundo ER (Fmin_2), la frecuencia central del canto (F_central), la frecuencia máxima del segundo silbido inicial (Fmax_SI2) y el número de silbidos iniciales (N_SI). Por su parte, el ruido, la temporada climática y la cobertura vegetal

fueron establecidas como variables independientes, realizando diferentes combinaciones en las que se incluyeron una, dos o tres de estas variables en cada modelo. El mejor modelo fue escogido bajo el criterio de información de Akaike. Los análisis estadísticos se realizaron en el programa R y las librerías Vegan y lme4 (R Core Team, 2019).

RESULTADOS

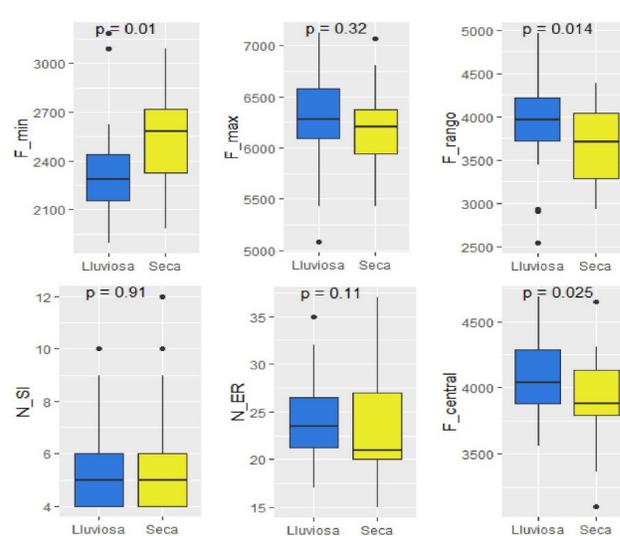
Se analizaron 67 cantos, 33 de ellos en temporada seca y 34 en temporada lluviosa, 31 en localidades con ruido alto y 36 con ruido bajo. El número de notas registradas en estos osciló entre 22 y 41, con un promedio de 6 SI, 24 ER, 4,37 s de duración y una frecuencia del canto entre $1.894,9 \pm 296,3$ y 7.125 ± 399 Hz. Los análisis mostraron que 14 variables fueron diferentes entre los tratamientos de ruido y entre temporadas climáticas. En los tratamientos de ruido, las variables F_max, F_rango y N_SI fueron significativamente diferentes (figura 3), mientras que en las temporadas climáticas la F_min, F_rango y F_central fueron las variables que mostraron esta misma tendencia (figura 4). Con relación a la cobertura vegetal, se encontró una correlación inversa (40-60 %) con las frecuencias máximas de los primeros siete ER, el número de ER y el número de notas totales.

Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes de los tratamientos de ruido y las variables frecuencia mínima (F_min), frecuencia máxima (F_max), rango de frecuencias (F_rango), número de silbidos iniciales (N_SI), número de elementos repetitivos (N_ER) y frecuencia central (F_central)



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Diagrama de cajas y bigotes de las temporadas climáticas y las variables frecuencia mínima (F_min), frecuencia máxima (F_max), rango de frecuencias (F_rango), número de silbidos iniciales (N_SI), número de elementos repetitivos (N_ER) y frecuencia central (F_central)



Fuente: elaboración propia.

Las variables seleccionadas para los GLM se ajustaron a una distribución gamma, excepto en el caso del N_SI, la cual se ajustó a una distribución poisson. La tabla 1 resume los modelos seleccionados de las combinaciones realizadas para cada variable del canto. Con relación al F_rango, la temporada climática y el ruido influyeron de forma significativa; en localidades con ruido alto el F_rango fue mayor y en la temporada seca este disminuyó. Para la F_min, la cobertura

vegetal mostró una relación inversamente proporcional. En cuanto a la F_central, de acuerdo con los resultados de los modelos durante la temporada seca, los valores de esta variable disminuyeron. En el caso de la Fmax_SI2, los valores de esta fueron mayores en las localidades con ruido alto y menores en las de mayor cobertura vegetal. Finalmente, para el N_SI, en localidades con ruido alto los valores reportados fueron mayores.

Tabla 1. Modelos lineales generalizados seleccionados para cada variable bajo criterio de información de Akaike

	Estimador	EE	Valor t	Valor p
F_rango Temporada climática + Ruido				
Intercepto	8,024	1,24e-01	64,499	<2e-16
T. seca	-6,02e-02	3,00e-02	-2,006	0,049
Ruido	3,92e-03	1,88e-03	2,084	0,041
Fmin_2 Cobertura vegetal				
Intercepto	8,347	5,71e-02	146,9	<2e-16
Cobertura	-4,22e-04	1,76e-04	-2,4	0,019
F_central Temporada climática				
Intercepto	8,318	1,28e-02	650,195	<2e-16
T. seca	-4,69e-02	1,82e-02	-2,573	0,012
Fmax_SI2 Cobertura vegetal + Ruido				
Intercepto	8,312	5,61e-02	148,257	<2e-16
Cobertura	-1,21e-04	7,68e-05	-1,569	0,122
Ruido	2,13e-03	9,09e-04	2,346	0,022
N_SI Ruido				
Intercepto	2,36e-01	4,42e-01	0,535	0,593
Ruido	2,31e-02	6,74e-03	3,425	0,001

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

El ruido, la temporada climática y la cobertura vegetal influyeron de forma significativa en algunas variables del canto de *Myiothlypis fulvicauda*. Como se esperaba, en localidades con ruido alto la frecuencia máxima fue mayor, mientras que en las localidades con mayor cobertura vegetal el canto tuvo menor número de notas. Además, en temporada lluviosa la frecuencia central y el rango de frecuencias fueron mayores.

Esta especie de ave está asociada a cuerpos de agua que generan ruido de considerable intensidad, al que debe adaptar su canto para ser escuchada. Una estrategia ampliamente documentada es el cambio de frecuencias a las que se emite el canto, principalmente un incremento, debido a que el ruido suele concentrarse a bajas frecuencias (Brumm & Naguib, 2009). En este estudio, la frecuencia máxima fue diferente entre tratamientos de ruido, siendo mayor en localidades de ruido alto; lo mismo ocurre con el rango de frecuencias. Lo anterior podría contribuir a que el canto (o parte de este) se transmita a pesar del ruido ambiental, especialmente en temporada lluviosa, cuando el ruido es mayor (Kirschel et al., 2009). Resultados similares han sido reportados para las especies *Pitangus sulphuratus* y *Turdus leucomelas* (Mendes et al., 2017; Mendoza & Arce-Plata, 2012).

Respecto a la frecuencia mínima, esta variable registró valores mayores en las localidades de ruido alto, aunque las diferencias no fueron significativas, posiblemente porque *M. fulvicauda* canta a altas frecuencias y el porcentaje de solapamiento con el ruido es mínimo (Escalante, 2013); como ocurre con *Troglodytes pacificus* y el ruido del oleaje o con *Cinclus cinclus* y el ruido de caídas de agua (Farina & Gage, 2017; Gough et al., 2014). Otros estudios han reportado que en algunas especies la frecuencia mínima no varía en lugares con ruido, como sucede con *Fringilla coelebs* cerca de quebradas y cascadas o *T. pacificus* cerca de oleaje (Brumm & Slater, 2006; Gough et al., 2014).

Por otro lado, los cantos redundantes tienen mayor probabilidad de ser escuchados en ambientes con altos niveles de ruido (Farina & Gage, 2017). El canto de *M. fulvicauda* estuvo formado por hasta 37 notas similares (los ER), que podrían hacerlo redundante. Además, en las localidades con ruido alto se encontró un mayor número de SI, evidenciando así una posible

adaptación de esta especie a las condiciones de ruido alto. En individuos de *M. fulvicauda* grabados en Costa Rica se encontraron números de notas similares, hasta 33 ER y 14 SI, en condiciones de ruido entre 49 y 60 dB (Escalante, 2013).

El rango de frecuencias varió entre temporadas climáticas, siendo menor en temporada seca; quizá porque la absorción del sonido es mayor por encima de los 30 °C (Snell-Rood, 2012). Esta situación estaría ocasionando una disminución en dicha variable para que el canto de *M. fulvicauda* sufra menor distorsión tras el aumento de la temperatura (31,6 °C lluviosa, 32,3 °C seca) (IDEAM, 2019). Según Schäfer et al. (2017), la variación del canto de *Cyanistes caeruleus*, *Parus major* y *Turdus merula* está asociada a variables como la humedad atmosférica, la presión del aire y la temperatura del suelo en áreas urbanas, las cuales estarían relacionadas con la temporada climática. Posiblemente, estas variables afectan el canto de las aves en ambientes naturales. Así mismo, la temporada climática también se asocia con variaciones en la abundancia de insectos como las chicharras, cuya estridulación afecta el canto de algunas aves (Hart et al., 2015), y con la pérdida de hojas en el Bs-T en temporada seca, lo que puede aumentar la probabilidad de detección del canto y la forma en que estos son emitidos o percibidos (Pacifi et al., 2008), variables importantes a considerar en futuros estudios.

Las propiedades del hábitat influyen en la propagación y degradación del sonido. En este estudio, al parecer, la cobertura vegetal favorece cantos con menor número de elementos repetitivos (trino más corto), menor número de notas totales y frecuencias máximas menores en aquellas áreas donde la cobertura vegetal es más densa. Es usual que los cantos en lugares con mayor cobertura vegetal tengan menos trinos que los de áreas abiertas, debido a que estos acumulan mayor reverberación, dificultando así la distinción entre notas (Naguib, 2003). Resultados similares fueron encontrados para *Ptilonorhynchus violaceus*, puesto que su canto en hábitats con vegetación densa no presentó trinos, o estos fueron cortos (Nicholls & Goldizen, 2006). Por otra parte, la disminución de la frecuencia máxima de los ER en localidades con mayor cobertura vegetal puede deberse a que en estas áreas la atenuación de las frecuencias altas es mayor (Handford & Loughheed, 1991).

CONCLUSIONES

Algunas variables del canto de *Myiothlypis fulvicauda* presentaron cambios entre temporadas climáticas y tratamientos de ruido. Principalmente, se observó un aumento en la frecuencia máxima, el rango de frecuencias y el número de silbidos iniciales en localidades con ruido alto (> 65 dB), así como un incremento en el rango de frecuencias y la frecuencia central durante la temporada lluviosa, lo que podría facilitar que el canto de esta ave sea escuchado. En cuanto a la cobertura vegetal, en localidades con mayor densidad se podría estar generando una mayor reverberación y atenuación en el canto, lo que estaría asociado con un menor número de elementos repetitivos y frecuencias máximas más bajas.

REFERENCIAS

- Brumm, H. (2004). The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*, 73(3), 434-440. <https://doi.org/10.1111/j.0021-8790.2004.00814.x>
- Brumm, H. (2013). *Animal communication and noise* (vol. 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7>
- Brumm, H., & Naguib, M. (2009). Chapter 1. Environmental acoustics and the evolution of bird song. En *Advances in the Study of Behavior* (1ª ed., vol. 40, núm. 09) (pp 1-33). Elsevier Inc. [https://doi.org/10.1016/S0065-3454\(09\)40001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-3454(09)40001-9)
- Brumm, H., & Slabbekoorn, H. (2005). Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behavior*, 35(05), 151-209. [https://doi.org/10.1016/S0065-3454\(05\)35004-2](https://doi.org/10.1016/S0065-3454(05)35004-2)
- Brumm, H., & Slater, P. J. B. (2006). Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 60(4), 475-481. <https://doi.org/10.1007/s00265-006-188y>
- Catchpole, C., & Slater, P. (2008). *Bird song. Biological themes and variations* (2ª ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754791>
- Center for Conservation Bioacoustics [CCB]. (2014). *Raven Pro: Interactive sound analysis software* (Version 1.5) [Computer software]. The Cornell Lab of Ornithology. <http://ravensoundsoftware.com/>
- Douglas, H. D., & Conner, W. E. (1999). Is there a sound reception window in coastal environments? Evidence from shorebird communication systems. *Nature Wissens Chaften*, 86(5), 228-230. <https://doi.org/10.1007/s001140050603>
- Escalante, I. (2013). Comportamiento de canto, descripción de las vocalizaciones y su posible variación geográfica en Costa Rica en *Myiothlypis fulvicauda*. *Zeledonia*, 17(1), 35-53. <http://www.avesdecostarica.org/uploads/7/0/1/0/70104897/17-1-000-dig.pdf#page=37>
- Farina, A., & Gage, S. H. (2017). *Ecoacoustics: The ecological role of sounds*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119230724>
- Fernández-Juricic, E., Poston, R., De-Collibus, K., Morgan, T., Bastain, B., Martin, C., Jones, K., & Treminio, R. (2005). Microhabitat selection and singing behavior patterns of male house finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the Western U.S. *Urban Habitats*, 3(1), 49-69.
- Gill, F. (2007). *Ornithology* (3ª ed). W. H. Freeman and Company.
- Gough, D. C., Mennill, D. J., & Nol, E. (2014). Singing seaside: Pacific wrens (*Troglodytes pacificus*) change their songs in the presence of natural and anthropogenic noise. *The Wilson Journal of Ornithology*, 126(2), 269-278. <https://doi.org/10.1676/13-088.1>
- Handford, P., & Loughheed, S. (1991). Variation in duration and frequency characters in the song of the Rufous-collared sparrow, *Zonotrichia capensis*, with respect to habitat, trill dialects and body size. *The Condor*, 93(3), 644-658. <https://doi.org/10.2307/1368196>

- Hart, P. J., Hall, R., Ray, W., Beck, A., & Zook, J. (2015). Cicadas impact bird communication in a noisy tropical rainforest. *Behavioral Ecology*, 26(3), 839-842. <https://doi.org/10.1093/beheco/arv018>
- Hilty, S., & Brown, W. (2001). *Guía de las aves de Colombia* (H. Álvarez-López, trad.). American Bird Conservancy-ABC.
- Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology*. Tropical Science Center.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019, julio 7). *Banco de datos estaciones automáticas*. IDEAM.
- Kirschel, A. N. G., Blumstein, D. T., Cohen, R. E., Buermann, W., Smith, T. B., & Slabbekoorn, H. (2009). Birdsong tuned to the environment: Green hylia song varies with elevation, tree cover, and noise. *Behavioral Ecology*, 20(5), 1089-1095. <https://doi.org/10.1093/beheco/arp101>
- Londoño, C. A. E., & Fernández, A. E. G. (2011). Protocolo para medir la emisión de ruido generado por fuentes fijas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 51-60. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v10n18/v10n18a06.pdf>
- Luther, D. A., Phillips, J., & Derryberry, E. P. (2016). Not so sexy in the city: Urban birds adjust songs to noise but compromise vocal performance. *Behavioral Ecology*, 27(1), 332-340. <https://doi.org/10.1093/beheco/arv162>
- Melo, O., & Vargas, R. (2002). *Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos*. Universidad del Tolima, CRQ, CARDER, Corpocaldas, Cortolima. http://academia.ut.edu.co/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/evaluacion%20de%20ecosistemas%20boscosos%20Rafael%20vargas%20y%20Omar%20mel.pdf
- Mendes, S., Colino-Rabanal, V. J., & Peris, S. J. (2017). Adaptación acústica del canto de *Turdus leucomelas* (Passeriformes: Turdidae) a diferentes niveles de ruido antrópico, en el área metropolitana de Belém, Pará, Brasil. *Revista de Biología Tropical*, 65(2), 633-642. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i2.25721>
- Mendoza, A. M., & Arce-Plata, M. I. (2012). Aproximación al impacto de la perturbación urbana en las vocalizaciones de *Pitangus sulphuratus* (Tyrannidae) en Santiago de Cali, Valle del Cauca (Colombia). *Revista de Ciencias*, 16, 19-29. <https://doi.org/10.25100/rc.v16i0.500>
- Morton, E. S. (1975). Ecological sources of selection on avian sounds. *The American Naturalist*, 109(965), 17-34. <https://doi.org/10.1086/282971>
- Naguib, M. (2003). Reverberation of rapid and slow trills: Implications for signal adaptations to long-range communication. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), 1749-1756. <https://doi.org/10.1121/1.1539050>
- Narins, P. M., Feng, A. S., Lin, W., Schnitzler, H. U., Denzinger, A., Suthers, R. A., & Xu, C. (2004). Old World frog and bird vocalizations contain prominent ultrasonic harmonics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2), 910-913. <https://doi.org/10.1121/1.1636851>
- Nicholls, J. A., & Goldizen, A. W. (2006). Habitat type and density influence vocal signal design in satin bowerbirds. *Journal of Animal Ecology*, 75(2), 549-558. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2006.01075.x>
- Pacifici, K., Simons, T. R., & Pollock, K. H. (2008). Effects of vegetation and background noise on the detection process in auditory avian point-count surveys. *The Auk*, 125(3), 600-607. <https://doi.org/10.1525/auk.2008.07078>
- Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, 26, 1213-12332. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>
- R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Sánchez-Guzmán, J. N., & Losada-Prado, S. (2016). Características de la avifauna en un fragmento de bosque húmedo premontano afectado por ruido vehicular. *Mutis*, 6(2), 7-18. <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1147>

- Sánchez-Rodríguez, E., López-Mata, L., García-Moya, E., & Cuevas-Guzmán, R. (2003). Estructura, composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 73, 17-34. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707302>
- Schäfer, J. E., Janocha, M. M., Klaus, S., & Tietze, D. T. (2017). How weather instead of urbanity measures affects song trait variability in three European passerine bird species. *Ecology and Evolution*, 7(13), 4868-4880. <https://doi.org/10.1002/ece3.3032>
- Slabbekoorn, H., & Peet, M. (2003). Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature*, 424, 267-268. <https://doi.org/10.1038/424267a>
- Snell-Rood, E. C. (2012). The effect of climate on acoustic signals: Does atmospheric sound absorption matter for bird song and bat echolocation? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2), 1650-1658. <https://doi.org/10.1121/1.3672695>
- Secretaría de Planeación y TIC [SPT]. (2014). *Estadísticas 2011-2014*. Gobernación del Tolima/ Universidad de Ibagué. <https://www.tolima.gov.co/descargar.php?idFile=2474>
- Swaddle, J. P., & Page, L. C. (2007). High levels of environmental noise erode pair preferences in zebra finches: Implications for noise pollution. *Animal Behaviour*, 74(3), 363-368. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.01.004>
- Vargas-Salinas, F., Dorado-Correa, A., & Amézquita, A. (2014). Microclimate and stream noise predict geographic divergence in the auditory signal of a threatened poison frog. *Biotropica*, 46(6), 748-755. <https://doi.org/10.1111/btp.12169>

Aproximación al tratamiento de aguas residuales del lavado del café con las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desmodesmus armatus*

An Approach for Treating Wet Coffee Processing Wastewater Using Microalgae *Parachlorella kessreli* and *Desmodesmus armatus*

Iván Alberto Sandoval Salazar^{ac}, Mohamed Toufic Darwich Cedeño^b, María Del Rosario Castañeda^{ad}, Wilmer Andrés Torres Munar^a, Luis Carlos Montenegro Ruiz^{be}

^a Grupo de Investigación Yamboró, Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Pitalito, Huila, Colombia

^b Laboratorio de Cultivo de Algas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

^c <https://orcid.org/0000-0002-5679-7798>

^d <https://orcid.org/0000-0002-6171-7756>

^e lcmontenegro@unal.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-6662-1833>

RESUMEN

Colombia es uno de los mayores productores de café en el mundo, con un mercado que superó los 13,9 millones de sacos en 2020. Sin embargo, en el proceso de beneficio húmedo del café se emplean grandes cantidades de agua, aproximadamente 4.154.354 m³, en las fases de despulpado, lavado y transporte del grano, generando aguas residuales contaminadas que tienen poco tratamiento antes de ser vertidas a las fuentes hídricas. En el presente trabajo se buscó aislar especies de microalgas que crezcan en estos ambientes, utilizar estas especies en procesos de depuración de aguas residuales del proceso de lavado del café y buscar una aplicación de la biomasa resultante. Para la obtención de las cepas de microalgas se utilizaron técnicas de agotamiento. Con el fin de evaluar su capacidad de depuración, estas fueron cultivadas en agua residual de diferentes concentraciones bajo condiciones de laboratorio, determinando la remoción de materia orgánica. Adicionalmente, se caracterizó bioquímicamente la biomasa algal para determinar posibles usos biotecnológicos o industriales. Se encontró dos Chloroficeae cocales, *Parachlorella kessreli* y *Desmodesmus armatus*, las cuales demostraron una alta eficiencia en la remoción de nitrógeno total (> 50 %) y fósforo total

Citation: Sandoval-Salazar, I. A., Darwich-Cedeño, M. T., Castañeda, M. R., Torres-Munar, W. A. y Montenegro-Ruiz, L. C. (2021). Aproximación al tratamiento de aguas residuales del lavado del café con las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desmodesmus armatus*. *Mutis*, 11(2), 32-43. <https://doi.org/10.21789/22561498.1755>

Recibido: 19 de mayo de 2021. **Aceptado:** 30 de junio de 2021.

Copyright: ©2021. Sandoval-Salazar, I. A., Darwich-Cedeño, M. T., Castañeda, M. R., Torres-Munar, W. A. y Montenegro-Ruiz, L. C. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.



(> 70 %), así como una disminución significativa de la DQO (> 70 %) en los mejores tratamientos. Finalmente, se encontró para *Parachlorella kessreli* alta producción de lípidos y para *Desmodesmus armatus* alta producción de proteína.

Palabras clave: café, aguas residuales, *Parachlorella*, *Desmodesmus*, depuración de agua, microalgas.

ABSTRACT

Colombia is one of the largest coffee producers in the world, with a market that exceeded 13.9 million bags in 2020. However, wet coffee processing requires large amounts of water —approximately 4,154, 354 m³— in the pulping, washing and transportation phases, generating contaminated wastewater that has little treatment before being discharged to water sources. Hence, this work sought to isolate microalgae species that grow in these environments to use them wastewater treatment processes from the coffee washing process and seek an application of the resulting biomass. Depletion techniques were used to obtain the microalgae strains. In order to evaluate their purification capacity, the microalgae were cultivated in wastewater at different concentrations under laboratory conditions, determining the removal of organic matter. Additionally, the algal biomass was biochemically characterized to determine possible biotechnological or industrial uses. Two coccal Chloroficeae, *Parachlorella kessreli* and *Desmodesmus armatus*, were found after this process. Both of them showed high efficiency in removing total nitrogen (>50%) and total phosphorus (>70%) while decreasing COD by more than 70% in the best treatments. High lipid production was found for *P. kessreli*, and high protein production for *D. armatus*.

Keywords: Coffee, wastewater, *Parachlorella*, *Desmodesmus*, water purification, microalgae.

INTRODUCCIÓN

El departamento del Huila es uno de los mayores productores de café en Colombia, con 2,5 millones de sacos producidos por año y 147.275 hectáreas sembradas en 35 de sus 37 municipios. El café producido en este departamento es reconocido a nivel mundial por la diversidad de sabores en taza, aroma y calidad, además de ser el principal factor económico y social de la región. A pesar de su importancia, el proceso de beneficio húmedo del café emplea grandes cantidades de agua en las etapas de despulpado, lavado y transporte del grano, registrando consumos aproximados de 4.154.354 m³ que equivalen a 37,2 L/kg de café pergamino seco (Rodríguez *et al.*, 2015). El proceso, a su vez, genera grandes volúmenes de aguas residuales que contaminan las aguas y los suelos de las zonas circundantes a las áreas de producción. Debido a los altos volúmenes de agua residual se hace imposible aplicar tratamientos antes de su vertimiento a cielo abierto, lo que deteriora las fuentes hídricas en las épocas de cosecha. En cuanto al grado de contaminación causado por las aguas mieles del café en un cuerpo de agua, se ha determinado que la demanda biológica de oxígeno (DBO5) aproximada es de 25.109 t, los sólidos

totales disueltos alcanzan 23.830 t y el DQO registra un valor de 55.000 mg/L (Rodríguez *et al.*, 2015).

En ese contexto, los impactos ambientales generados por el procesamiento del café se relacionan con la pérdida de la biodiversidad en aguas y suelos, una disminución en la calidad de vida de los productores, quienes reportan problemas de salud por el consumo de aguas contaminadas, la presencia de malos olores, la aparición de insectos vectores, y un menor rendimiento de los suelos, ocasionado por el alto contenido de materia orgánica y acidez que altera el microbiota. Por lo anterior, la mitigación de los impactos ambientales causados por las aguas residuales del café mediante el uso de microorganismos nativos como microalgas y cianobacterias se convierte en una alternativa viable y con potencial para el tratamiento terciario de este subproducto del café en el departamento del Huila.

Durante los últimos años, las microalgas y cianobacterias se han utilizado como sistemas biológicos alternativos al tratamiento de aguas residuales, en gran parte por su capacidad de combinar su metabolismo autótrofo con el heterótrofo, con lo cual consumen sales e iones en presencia de luz, a la

vez que pueden consumir moléculas orgánicas. Investigaciones desarrolladas por Li Wu *et al.* (2018), quienes cultivaron la cianobacteria *Scytonema javanicum* en aguas residuales sintéticas artificiales, determinaron el potencial remediador de nitrógeno y fosfatos de este organismo. Por su parte, Lynch *et al.* (2015) aislaron siete especies nativas de cianobacterias y un alga verde con el fin de evaluar su capacidad de eliminación de nutrientes, logrando con ello eliminar totalmente el fosfato y el amonio, y obteniendo al final un alto contenido de biomasa. Gorain *et al.* (2019) evaluaron la eliminación de nitrógeno y fosfato en aguas residuales agrícolas utilizando la cianobacteria *Anabaena sphaerica* y *A. variabilis* durante 30 días en un sistema de cultivo semicontinuo, encontrando que cerca del 90 % de N y P fueron eliminados, además de que la biomasa producida reportaba altos contenidos de ácidos grasos esenciales con potencial para su uso en la producción de nutraceuticos.

Sumado a lo anterior, se ha evaluado también el uso conjunto de microalgas y cianobacterias (*Oscillatoria sp.*) para la eliminación de nitrógeno y fósforo inorgánico en aguas residuales, encontrando que es posible eliminar 36 mg de N y 0,35 mg de P por día y generar una producción de biomasa de 0,15mg/día (Arias *et al.*, 2017). Otras algas y cianobacterias que han dado buenos resultados en depuración son *Phormidium sp.*, capaz de eliminar 100 % de ortofosfato, 87 % de nitrato, 68 % de fosfato total y 48 % de ion amonio (Cañizares-Villanueva *et al.*, 1994), *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus*, empleadas para la remoción de cromo en aguas de curtiembres (Ardila *et al.*, 2017).

Para aguas residuales del proceso productivo de café no se han realizado tratamientos con algas, hasta donde conocemos, aunque sí se ha avanzado en la investigación con otros microorganismos que resultan ser eficientes en la depuración de las aguas finales del proceso. Entre los trabajos que se destacan por dar resultados positivos está el de Ashenafi *et al.* (2021), quienes evaluaron a escala laboratorio la eficiencia de las bacterias *Pseudomonas fluorescence* y *Escherichia coli*, obteniendo en 144 horas reducción de DBO₅, DQO y TS. De otro lado, Pires *et al.* (2021) desarrollaron un protocolo para la obtención de microorganismos con potencial para la remoción de la carga orgánica a partir de la microbiota autóctona de las aguas residuales de la producción de café,

logrando efectividad en un consorcio bacteriano compuesto por *Serratia marcescens*, *Corynebacterium flavescens* y *Acetobacter indonesiensisk*, con el que se logró disminuir 85 % la DBO₅, 60 % la DQO y 80 % el fósforo y el nitrógeno. Resultados similares se alcanzaron con cepas bacterianas autóctonas aisladas de las aguas residuales del despulpado de la cereza de café (*Enterobacter ludwigii*, *Bacillus cereus*, *Enterobacter aerogenes* y *Enterobacter cloacae*), disminuyendo hasta en 40 % la DQO (Jenifer *et al.*, 2020). También se han realizado trabajos con los hongos *Aspergillus niger* y *Aspergillus flavus*, microorganismos aislados de las mismas aguas residuales, alcanzando una reducción de hasta 80 % de DQO y DBO (Navitha & Kousar, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo llevó a cabo una exploración de especies de microalgas aisladas de los procesos de producción de café con alta capacidad para depurar las aguas residuales y, a la vez, hacer posible que la biomasa algal producida tenga un valor agregado para su utilización en procesos tanto biotecnológicos como industriales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta de algas y obtención de cepas

Las muestras analizadas provienen de fincas cafeteras del municipio de Isnos (Huila, Colombia). Se realizó toma de muestras en los tanques de almacenamiento de pulpa de café, mucilago y en los procesos de filtrado de aguas residuales del proceso de producción de café. Las muestras de agua se recolectaron en tubos Falcon de 50 mL para luego ser etiquetadas y conservadas en oscuridad a temperatura ambiente hasta el momento de su procesamiento.

Para la obtención de cepas unialgales se utilizó la técnica de rayado en agar por agotamiento. Como medio de cultivo se utilizó medio básico Bold (BBM) enriquecido con agar-agar 1,5 %. En esta fase se hicieron tantos repiques como fueron necesarios hasta alcanzar una cepa unialgal (Andersen, 2005).

Identificación molecular de las cepas

Para la identificación de las cepas se aisló ADN siguiendo el protocolo del kit ZYMO Research Quick-DNA TM Plant/Seed Micropep (ZYMO Research Corp.,

Irvine, Estados Unidos, catálogo D6020). Para comprobar la obtención de ADN se realizó electroforesis en gel de agarosa a 1,5 %, utilizando como marcador buffer de carga e HydraGreen™ Safe DNA Dye-Thomas Scientific. Para las cepas se amplificó el gen 18s con los cebadores 18s F (AACCTGGTTGATCTGCCAG) y 18s R (CACCAGACTTGCCCTCCA).

Todas las reacciones se realizaron en un termociclador MyCycler™ (Bio-Rad laboratorios Inc., Hercules, CA, EE. UU.) en alícuotas de 20 µL que contenían 10 µL de PCR mix – 100 2X (Corpogen, Colombia), 1 µL de cebador F, 1 µL de cebador R (cada cebador a una concentración de 10 µM), 0,5 µL de ADN y agua grado biología molecular, hasta alcanzar un volumen final de 20 µL. El programa de PCR fue 94 °C durante 5 minutos, seguidos de 35 ciclos de 94 °C durante 1 min, 55 °C por 1 s y 72 °C durante 3 min, así como una extensión final a 72 °C durante 10 min.

La limpieza de los productos de PCR se realizó con el Kit DNA Clean & Concentration TM-5 (ZYMO Research Corp., Irvine, Estados Unidos, catálogo D4013). La electroforesis se corrió en gel de agarosa al 1 % con marcador HydraGreen™ Safe DNA Dye-Thomas Scientific por aproximadamente una hora, con voltaje de 100 V. Finalmente, se observó el resultado en un documentador de geles (Gel Doc™ XR+, BioRad).

Los productos purificados de PCR fueron enviados a la casa comercial (SSigMOL, Instituto de Genética, Universidad Nacional, Colombia) para el respectivo secuenciamiento. Las secuencias se editaron usando el programa Sequencher 5.1 (Gene Code Corporation, 2017). Las comparaciones de secuencias se llevaron a cabo utilizando las bases de datos BLAST del National Center for Biotechnology Information.

Caracterización bioquímica de las cepas seleccionadas

Las dos cepas fueron cultivadas en medio BBM en un volumen de 1 L, las condiciones de cultivo fueron irradiancia de 300 µmol de fotones m⁻² s⁻¹, fotoperíodo de 12:12 horas luz/oscuridad, 25 °C +/- 3 °C y burbujeo permanente con aire del ambiente. La biomasa se recolectó en fase estacionaria, siendo deshidratada a baja temperatura.

La determinación de proteínas se realizó por el método de Bradford (1976), para lo cual se pesó

aproximadamente 0,01 g de biomasa liofilizada en tubos Falcon de 15 ml, se adicionó 6 ml de buffer de fosfato de sodio [0,02 M; pH 6] (Melgarejo, 2010) y perlas de sílice (para asegurar el rompimiento celular). Esta muestra se pasó por vórtex durante 5 min y se centrifugó a 6.000 rpm por 5 min. Se extrajo 0,8 ml de sobrenadante, el cual fue dispuesto en tubo Eppendorf de 2 ml, añadiendo 0,2 ml de reactivo de Bradford (Bio-Rad 2006) y agitando fuertemente en un vórtex por un minuto, para luego incubar por cinco minutos y medir la absorbancia a 595 nm. Cada mezcla de reacción se realizó por triplicado.

La determinación de carbohidratos se realizó por el método de DuBois (DuBois *et al.*, 1956; Gerchakov & Hatcher 1972; Melgarejo 2010), para lo cual se pesó aproximadamente 0,01 g de biomasa liofilizada en tubos Falcon de 15 ml, agregando 6 ml de H₂O destilada y desionizada y perlas de sílice (para asegurar el rompimiento celular). La muestra se pasó por vórtex durante 5 min y se centrifugó a 6.000 rpm por 5 min. Se extrajo 210 µl de sobrenadante, el cual fue dispuesto en tubo Eppendorf de 2 ml, posteriormente añadiendo 0,2 ml de fenol al 80 % y 1 ml ácido sulfúrico (H₂SO₄), para luego agitar la muestra fuertemente en un vórtex por un minuto y dejar enfriar a temperatura ambiente y en oscuridad (el compuesto que se forma es estable por 36 horas). Se midió la absorbancia a 485 nm. Cada mezcla de reacción se realizó por triplicado.

La determinación de lípidos se realizó por el método de Sulfofosfovainillina (Byreddy *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2011; Mishra *et al.*, 2014). Se pesó aproximadamente 0,01 g de biomasa liofilizada en tubos Falcon de 15 ml, se adicionó 2 ml de cloroformo:metanol [1:1] y perlas de sílice (para asegurar el rompimiento celular), pasando la muestra por vórtex durante 5 min y centrifugando a 6.000 rpm por 5 min. Se extrajo 60 µl de sobrenadante, siendo este dispuesto en tubo Eppendorf de 2 ml, para luego añadir 300 µl de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado y someter la muestra a baño María de 90 °C durante 20 min, para así evaporar los solventes y propiciar la reacción de hidrólisis. La muestra fue luego enfriada en un congelador durante 10 min y se agregó 500 µl de ácido fosfórico al 17 % - Vainillina [0,2 g de vainillina/ml ácido fosfórico al 17 %]. Se agitó por vórtex y se midió a 540 nm. Todas las extracciones se realizaron por triplicado.

Tratamiento de aguas residuales del lavado de café

Para los tratamientos se utilizó agua proveniente del tanque del proceso de lavado del café, la cual fue recolectada en envases plásticos de 20 L y almacenada a -20 °C hasta el momento de su uso. Para limpiar las aguas residuales con microalgas se realizaron 2 experimentos con los siguientes tratamientos:

Experimento 1 (*Parachlorella kessleri*)

- Agua residual al 100 % + *P. kessleri*
- Agua residual al 50 % + *P. kessleri*
- Agua residual al 25 % + *P. kessleri*

Experimento 2 (*Desmodesmus armatus*)

- Agua residual al 100 % + *D. armatus*
- Agua residual al 50 % + *D. armatus*
- Agua residual al 25 % + *D. armatus*

Las aguas residuales se filtraron con ayuda de una bomba al vacío, usando filtros de 0,45 µm. Seguidamente, estas fueron esterilizadas durante 20 minutos a 120 °C y 15 PSI. Las diluciones del agua residual se realizaron con agua destilada desionizada. La unidad experimenta fue un frasco de vidrio 2,5 L, al que se añadió 1,85 L de agua residual y 0,15 L de inóculo de alga, para una concentración final de algas de 1×10^6 células/mL.

Las condiciones de cultivo fueron irradiancia de 300 µmol de fotones $m^{-2} s^{-1}$, fotoperíodo de 12:12 horas luz/oscuridad, 25 °C +/- 3 °C y burbujeo permanente con aire del ambiente. Los cultivos se mantuvieron por 15 días.

Para cada tratamientos se determinó DQO, fósforo total y nitrógeno total. Las mediciones se hicieron al inicio y final del cultivo, con el fin de determinar el efecto de las algas en la limpieza de aguas residuales del proceso de producción de café.

Análisis estadístico

Se realizó una estadística descriptiva, determinando la media para el resultado de cada tratamiento con su respectiva desviación estándar. Para los experimentos de limpieza de agua la unidad experimental fueron

recipientes con 1,8 L de medio, luego de 4 repeticiones por tratamiento.

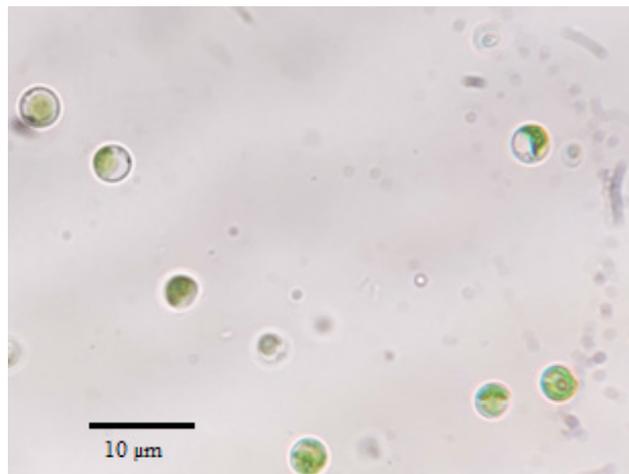
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtención de cepas unialgal

Se obtuvieron dos cepas de microalgas de la clase Chlorophyceae:

- Cepa 1: *Parachlorella kessleri* (Fott & Nováková) Krienitz, E.H.Hegewald, Hepperle, V.Huss, T.Rohr & M.Wolf 2004 (figura 1).

Figura 1. *Parachlorella kessleri* (1.000x)



Fuente: Luis Carlos Montenegro Ruíz.

La secuencia que se obtuvo del gen ribosomal 18s fue:

```
CCAGTAGTCATATGCTTGTCTCAAAGATTAAGCCATGCATGTCTAA-
GTATAAACTGCTTTATACTGTGAAACTGCGAATGGCTCATTAAAT-
CAGTTATAGTTTATTGATGGTACCTTACTACCGGATAACCGTAG-
TAATTCTAGAGCTAATACGTGCGTAAAYCCCGACTYCTGGAAGG-
GRCGTATTTATTAGATTTAAGGCCGACCCGGCTCTGCCGGTCTC-
GCGGTGAATCATGATAACTTACGAATCGCATGGCCTTGCGCCG-
GCGATGTTTCATTCAAATTTCTGCCCTATCAACTTTCGATGGTAG-
GATAGAGGCTACCATGGTGTAACGGGTGACGGAGGATTAG-
GGTTCGATTCCGGAGAGGGAGCCTGAGAAACGGCTACCACATC-
CAAGGAAGGCAGCAGGCGCGCAAATTACCCAATCCTGACACAG-
GGAGGTAGTGACAATAAATAACAATACCGGGCCTTTTCAGGTCT-
GGTAATTGGAATGAGTACAATCTAA
```

El resultado del Blast se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultado del Blast para la cepa 1

Accesión	Nombre	Porcentaje de identidad	Fuente
AB162911.1	<i>Parachlorella kessleri</i>	99,41 %	Hoshina <i>et al.</i> (2004)
AB080309.1	<i>Parachlorella kessleri</i>	99,41 %	Yamamoto <i>et al.</i> (2003)
LC473527.1	<i>Parachlorella kessleri</i>	99,41 %	Sasaki <i>et al.</i> (2020)

Fuente: elaboración propia.

- Cepa 2: *Desmodesmus armatus* (Chodat) E.H.Hegewald 2000 (figura 2).

Figura 2. *Desmodesmus armatus* (1.000x)



La secuencia que se obtuvo del gen ribosomal 18s fue:

```
GATCCTGCCAGTAGTCATATGCTTGTCTCAAAGATTAAGCCATGCATGTCTAAGTA-
TAAACTGCTTATACTGTGAAACTGCGAATGGCTCATTAAATCAGTTATAGTTATTTG-
GTGGTACCTTCTTACTCGGAATAACCGTAAGAAATTTAGAGCTAATACGTGCGTAA-
ATCCCGACTTCTGGAAGGGACGTATATATTAGATAAAAGGCCGACCGGGCTCTGCC-
CGACCCGCGGTGAATCATGATATCTTACGAAGCGCATGGCCTTGTGCCGGCGCTG-
TTCCATTCAAATTTCTGCCCTATCAACTTTCGATGGTAGGATAGAGGCCTACCATGGT-
GGTAACGGGTGACGGAGGATTAGGGTTCGATTCCGGAGAGGGAGCCTGAGAAAC-
GGTACCACATCCAAGGAAGGCAGCAGGCGCGCAAATTACCAATCCTGATACGGG-
GAGGTAGTGACAATAAATAACAATACCGGCATTTCATGTCTGGTAATTGGAATGAG-
TACAATCTAAATCCCTAACGAGGATCCATTGGA
```

El resultado del Blast para esta cepa se muestra en la tabla 2.

Fuente: Luis Carlos Montenegro Ruíz.

Tabla 2. Resultado del Blast para la cepa 2

Accesión	Nombre	Porcentaje de identidad	Fuente
KP281291.1	<i>Desmodesmus armatus</i>	100 %	Westblade <i>et al.</i> (2015)
MK541733.1	<i>Desmodesmus armatus</i>	100 %	Rad-Menendez (2019)

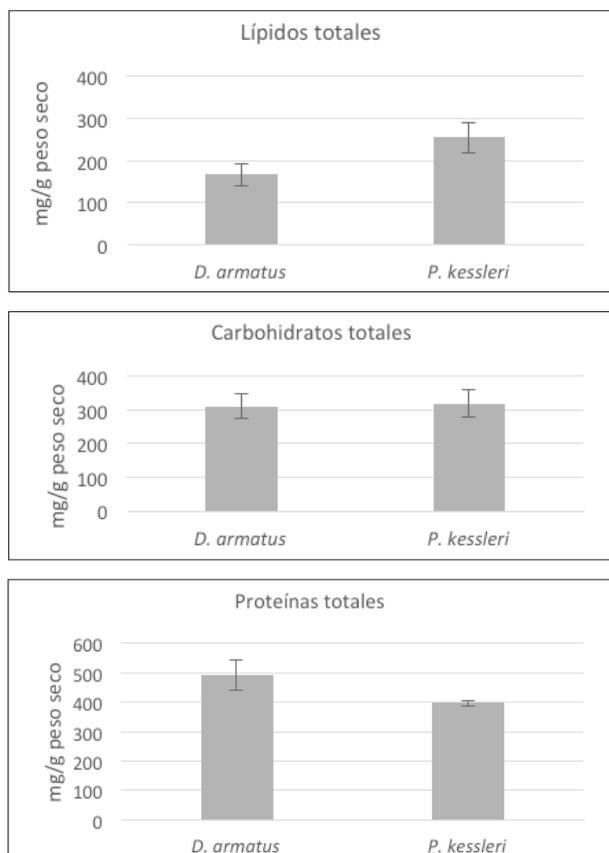
Fuente: elaboración propia.

Análisis bioquímicos de las cepas de *D. armatus* y *P. kessleri*

Se encontró que bajo condiciones de cultivo óptimas, en el día 10, durante la fase estacionaria, la composición bioquímica de *D. armatus* fue: proteínas 493,33 mg/g peso seco, carbohidratos 310,01 mg/g peso seco y lípidos 166,66 mg/g peso seco. Para *P. kessleri* la composición fue: proteínas 396,66 mg/g peso seco, carbohidratos 320,03 mg/g peso seco y lípidos 255,05 mg/g peso seco (figura 3).

Los resultados obtenidos muestran que *D. armatus* y *P. kessleri* tienen contenidos de proteínas, carbohidratos y lípidos similares a los reportados para las especies de los géneros *Chlorella*, *Parachlorella*, *Desmodesmus* y *Scenedesmus* (Gómez *et al.*, 2017; Palomino *et al.*, 2019; Serrano *et al.*, 2020). Además, se destaca el alto contenido de proteínas en *D. armatus* y el alto contenido de lípidos en *P. kessleri*, dando buenas expectativas para su uso biotecnológico en diferentes sistemas.

Figura 3. Contenido de lípidos, carbohidratos y proteínas en *D. armatus* y *P. kessleri* cultivadas bajo condiciones óptimas



Fuente: elaboración propia.

Las microalgas con alta producción de lípidos son consideradas como materia prima de tercera generación para la producción de biocombustibles (Palomino *et al.*, 2019; Serrano *et al.*, 2020). Los altos contenidos de proteína pueden ser aprovechados para el consumo humano o la elaboración de alimentos concentrados para animales (Chew *et al.*, 2017; González-Delgado *et al.*, 2017; Guccione *et al.*, 2014). Además, se ha encontrado actividad antimicrobiana en varias proteínas en géneros de *Parachlorella* y *Chorella* (Yu-Cheng *et al.*, 2019), por lo que otro mercado importante es el de pigmentos obtenidos a partir de estas algas, los cuales son utilizados en la industria alimenticia o nutraceútica como antioxidantes (Kulkarni & Nikolov 2014; Pozzobona *et al.*, 2020; Safi *et al.*, 2014).

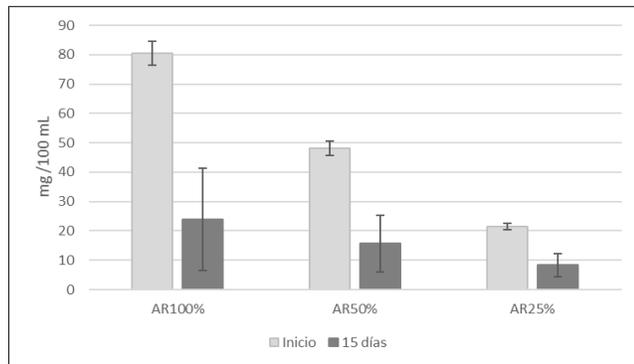
Como se mencionó, después del tratamiento de aguas residuales, la biomasa de microalgas resultante se puede convertir en múltiples productos con alto valor agregado. Las proteínas corresponden a uno de los principales constituyentes de las microalgas y representan entre 50 y 70 %, junto con rendimientos en carbohidratos y grasas con valores cercanos a 40 y 30 % de la biomasa en peso seco, respectivamente (Alavijeh *et al.*, 2020); esto, en función de las especies utilizadas y la fase de crecimiento del cultivo al momento de la cosecha. En el género *Chlorella* sp., cercano a *Parachlorella*, algunos estudios han realizado aproximaciones a sus rendimientos de macromoléculas, obteniendo porcentajes en aguas residuales de 51-63 % de contenido proteico, 12-17 % de carbohidratos y 14-22 % de lípidos (Mtaki *et al.*, 2021). Por otro lado, en el género *Desmodesmus* sp. se reportan rendimientos de 11-25 % de proteína, 17-37 % de carbohidratos (Sun *et al.*, 2020) y 26-60 % de lípidos (Chen *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). A partir de estos hallazgos, se evidencia que el tratamiento de aguas residuales con microalgas puede tener un doble propósito, puesto que también contribuye a reducir la huella hídrica en algunos procesos productivos (Chen *et al.*, 2020).

Remoción de nutrientes de aguas residuales del café

Se observó que *P. kessleri* y *D. armatus* son eficientes para la remoción de nitrógeno en aguas residuales, sin importar la concentración inicial de la misma. *P. kessleri* remueve 70, 67 y 61 % del nitrógeno de las aguas al 100, 50 y 25 % de concentración, respectivamente.

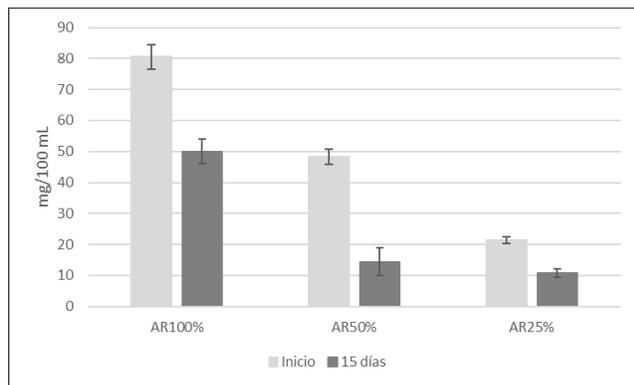
Por su parte, *D. armatus* remueve 38, 70 y 50 % del nitrógeno al 100, 50 y 25 % de concentración, respectivamente (figuras 4 y 5).

Figura 4. Disminución del contenido de nitrógeno total en aguas residuales del lavado de café utilizando *P. kessreli* durante 15 días de tratamiento



Fuente: elaboración propia.

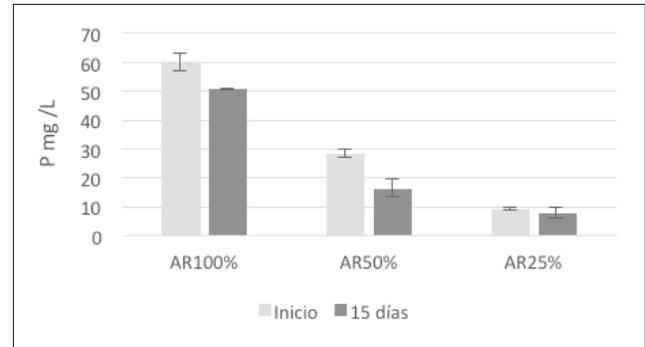
Figura 5. Disminución del contenido de nitrógeno total en aguas residuales del lavado de café utilizando *D. armatus* durante 15 días de tratamiento



Fuente: elaboración propia.

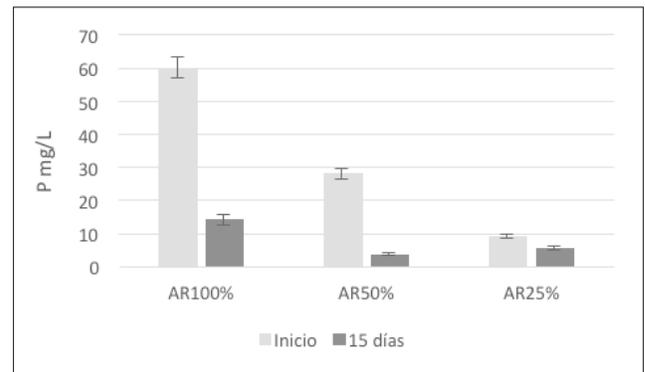
De otro lado, los resultados muestran que *D. armatus* es más eficiente en la remoción de fósforo que *P. kessreli*. Para ambas especies, la capacidad de consumir fósforo es baja a bajas concentraciones de agua residual, puesto que *P. kessreli* remueve 15, 42 y 15 % del fósforo al 100, 50 y 25 % de concentración, respectivamente, mientras que *D. armatus* remueve 77, 87 y 38 % de este elemento al 100, 50 y 25 % de concentración, respectivamente (figuras 6 y 7).

Figura 6. Disminución del contenido de fósforo total en aguas residuales del lavado de café utilizando *P. kessreli* durante 15 días de tratamiento



Fuente: elaboración propia.

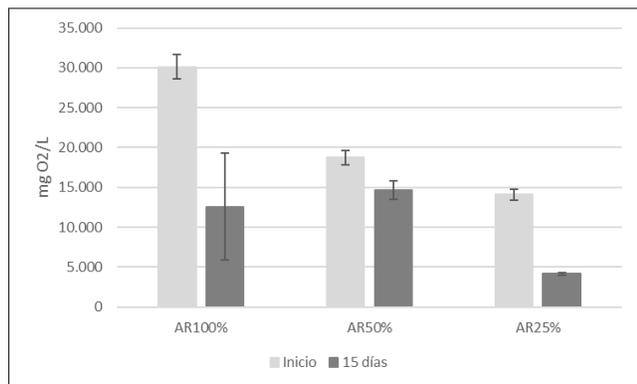
Figura 7. Disminución del contenido de fósforo total en aguas residuales del lavado de café utilizando *D. armatus* durante 15 días de tratamiento



Fuente: elaboración propia.

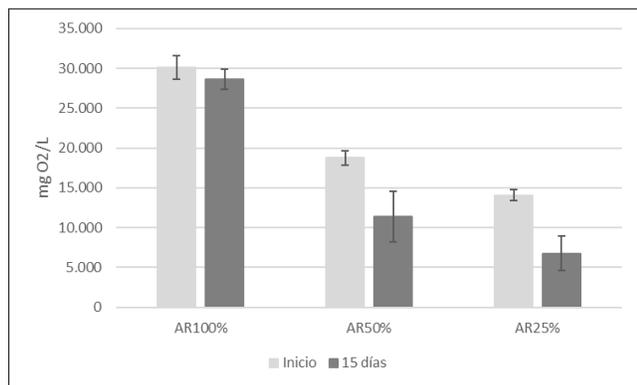
También se observó que *P. kessreli* es más eficiente disminuyendo la DQO que *D. armatus*, alcanzado cifras de remoción entre 60 y 70 %, de acuerdo con la concentración inicial. Por su parte, *D. armatus* solo disminuyó la DQO un 50 % a baja concentración, sin alcanzar valores importantes en altas concentraciones de agua residual (figuras 8 y 9).

Figura 8. Disminución de la DQO en aguas residuales del lavado de café utilizando *P. kessreli* durante 15 días de tratamiento



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Disminución de la DQO en aguas residuales del lavado de café utilizando *D. armatus* durante 15 días de tratamiento



Fuente: elaboración propia.

Las aguas residuales producto de las industrias agropecuarias se caracterizan por altas cargas de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y fósforo. Estos compuestos constituyen un factor crítico para problemáticas ambientales como la erosión del suelo, la contaminación atmosférica producto de la volatilización de amoníaco y sulfuro de hidrógeno y la eutrofización de cuerpos de agua (Mousavi *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). En la actualidad, las aguas residuales se suelen someter a procesos oxidativos en lagunas para luego ser tratadas en lagunas anaeróbicas y, como etapa final, en lagunas aeróbicas facultativas o reactores de película con lecho móvil (Wang *et al.*, 2020), donde las microalgas son las protagonistas, ya

que no solo gobiernan el consumo de CO₂ sino que también brindan una alternativa segura y rentable a la aireación mecánica (Chen *et al.*, 2020). Las microalgas juegan un papel esencial en estas últimas etapas, demostrando una notable capacidad de absorber nitrógeno y fósforo inorgánicos de forma eficiente, puesto que en este punto los contaminantes han sido degradados y mineralizados por acción de microorganismos heterotróficos (Nur & Buma, 2019; Wang *et al.*, 2020).

Especies de algas como *Scenedesmus obliquus* y *Chlorella sp.* han sido estudiadas para el tratamiento de aguas residuales, generando resultados prometedores en la eliminación de DQO, P y N, con rendimientos aproximados para el género *Desmodesmus sp.* de 92,9 % para amonio y 88,5 % para nitrógeno total, así como remociones de 40,8 % para fósforo y 61,9 % para carbono orgánico disuelto (COD) en 14-17 días de tratamiento (Chen *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2017). Por otro lado, *Chlorrella sp.* reporta rendimientos para remoción de nitrógeno total de 95-100 %, fósforo de 85-95 % y COD de 90 % en 14-24 días de tratamiento (Chen *et al.*, 2020; Sepehri *et al.*, 2020), resultados similares a los encontrados en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

Las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desodesmus armatus* son eficientes en la depuración de aguas residuales provenientes del lavado del café. Nuestros hallazgos muestran que en 15 días estas algas disminuyen el contenido de sustancias nitrogenadas y fosfatos en cifras superiores a 50 %, comprobando su potencial para los sistemas rurales de tratamiento de aguas contaminadas con características similares a los analizados en esta investigación.

Aunque existe una gran diversidad de microalgas con alto potencial para el tratamiento de aguas residuales, son pocas las que permiten su aislamiento y cultivo *in vitro*. En el presente estudio se alcanzó a tener dos cepas de clorofíceas *Parachlorella kessreli* y *Desodesmus armatus*.

Debido al alto contenido de lípidos de *Parachlorella kessreli* se recomienda su uso para la producción de biocombustibles o alimento para animales, mientras que *Desodesmus armatus* resulta ser adecuada para la alimentación humana y animal, gracias a su alta producción de proteína.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio de Aprendizaje Nacional (SENA), convocatoria SENNOVA 2020.

REFERENCIAS

- Alavijeh, R. S., Karimi, K., Wijffels, R. H., van den-Berg, C., & Eppink, M. (2020). Combined bead milling and enzymatic hydrolysis for efficient fractionation of lipids, proteins, and carbohydrates of *Chlorella vulgaris* microalgae. *Bioresource Technology*, 309, 123321. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123321>
- Andersen, R. (2005). *Algal culturing techniques*. Elsevier Academic Press.
- Ardila, L., Godoy, R. D., & Montenegro, L. C. (2017). Sorption capacity measurement of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* to remove chromium from tannery wastewater. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 83, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/83/1/012031>
- Arias, D. M., Uggetti, E., García-Galán, M. J., & García J. (2017). Cultivation and selection of cyanobacteria in a closed photobioreactor used for secondary effluent and digestate treatment. *Science of The Total Environment*, 587-588, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.097>
- Ashenafi, F. (2019). *Treatment of wastewater effluent from coffee industry using anaerobic mixed culture pseudomonas florescence and Escherichia coli bacteria and with gypsum: A case in Dilla-Ethiopia* (Tesis de maestría, Addis Ababa Institute of Technology). Repositorio Addis Ababa Institute of Technology.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Crop Journal*, 72, 248-254. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003>
- Byreddy, A., Gupta, A., Barrow, C., & Puri, M. (2016). A quick colorimetric method for total lipid quantification in microalgae. *Journal of Microbiological Methods*, 125, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2016.04.002>
- Cañizares-Villanueva, R. O., Ramos A., Corona, A. I., Monroy, O., de-la-Torre, M., Gomez-Lojero, C., & Travieso L. (1994). Phormidium treatment of anaerobically treated swine wastewater. *Water Research*, 9(28), 1891-1895. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90164-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90164-3)
- Chen, C. Y., Kuo, E. W., Nagarajan, D., Ho, S. H., Dong, C. D., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2020). Cultivating *Chlorella sorokiniana* AK-1 with swine wastewater for simultaneous wastewater treatment and algal biomass production. *Bioresource Technology*, 302, 122814. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122814>
- Chen, Z., Shao, S., He, Y., Luo, Q., Zheng, M., Zheng, M., Chen, B., & Wang, M. (2020). Nutrients removal from piggery wastewater coupled to lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Desmodesmus sp.* PW1. *Bioresource Technology*, 302, 122806. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122806>
- Cheng, Y. S., Zheng, Y., & Vander-Gheynst, J. S. (2011). Rapid quantitative analysis of lipids using a colorimetric method in a microplate format. *Lipids*, 46(1), 95-103. <https://doi.org/10.1007/s11745-010-3494-0>
- Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2017). Microalgae biorefinery: High value products perspectives. *Bioresource Technology*, 229, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006>
- DuBois, M., Gilles, K., Hamilton, J., Rebers, P., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Ferreira, A., Ribeiro, B., Marques, P. A. S., Ferreira, A. F., Dias, A. P., Pinheiro, H. M., Reis, A., & Gouveia, L. (2017). *Scenedesmus obliquus* mediated brewery wastewater remediation and CO₂ biofixation for green energy purposes. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1316-1327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.232>

- Gerchakov, S., & Hatcher, P. (1972). Improved technique for analysis of carbohydrates in sediments. *Limnology and Oceanography*, 17(6), 938-943. <https://doi.org/10.4319/lo.1972.17.6.0938>
- Gómez-Pérez, C., Espinosa, J. J., Montenegro, L. C., & Van-Boxtela, J. B. (2017). Twisted tubular photobioreactor fluid dynamics evaluation for energy consumption minimization. *Algal Research*, 27, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.08.019>
- González-Delgado, A. D., Barajas-Solano, A., & Ardila-Álvarez, A. M. (2017). Producción de biomasa y proteínas de *Chlorella vulgaris* Beyerinck (Chlorellales:Chlorellaceae) a través del diseño de medios de cultivo selectivos. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:736
- Gorain, P. C., Paul, I., Singh, P., & Pala, R. (2019). An integrated approach towards agricultural wastewater remediation with fatty acid production by two cyanobacteria in bubble column photobioreactors. *Algal Research*, 42, 101-594. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101594>
- Guccione, A., Biondi, N., Sampietro, G., Rodolfi, L., Bassi, N., & Tredici, M. R. (2014). *Chlorella* for protein and biofuels: from strain selection to outdoor cultivation in a green wall panel photobioreactor. *Biotechnology for Biofuels*, 7, 84. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-84>
- Hoshina, R., Kamako, S. I., & Imamura, N. (2004). Phylogenetic position of endosymbiotic green algae in *Paramecium bursaria* Ehrenberg from Japan. *Plant Biology*, 6(4), 447-453. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820888>
- Jennifer, A. A., Chandran, T., Muthunarayanan, V., Ravindran, B., Nguyen, V. K., Nguyen, X. C., Bui, X. T., Ngo, H. H., Nguyen, X. H., Chang, S. W., & Nguyen, D. D. (2020). Evaluation of efficacy of indigenous acidophile- bacterial consortia for removal of pollutants from coffee cherry pulping wastewater. *Bioresource Technology Reports*, 11(September), 100533. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100533>
- Kulkarni, S., & Nikolov, Z. (2018). Process for selective extraction of pigments and functional proteins from *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, 35, 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.08.024>
- Lynch, F., Santana-Sánchez, A., Jämsä, M., Sivonen, K., Aro, E. A., & Allahverdiyeva, Y. (2015). Screening native isolates of cyanobacteria and a green alga for integrated wastewater treatment, biomass accumulation and neutral lipid production. *Algal Research*, 11, 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.05.015>
- Melgarejo, L. (2010). *Experimentos en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mishra, S., Suh, W., Farooq, W., Moon, M., Shrivastav, A., Park, M., & Yang, J. (2014). Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method. *Bioresource Technology*, 155, 330-333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.077>
- Mousavi, S. A., Sarshad, M., & Soltani, S. (2020). Negative impacts of nomadic livestock grazing on common rangelands' function in soil and water conservation. *Ecological Indicators*, 110, 105946. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105946>
- Mtaki, K., Kyewalyanga, M. S., & Mtolera, M. S. P. (2021). Supplementing wastewater with NPK fertilizer as a cheap source of nutrients in cultivating live food (*Chlorella vulgaris*). *Annals of Microbiology*, 71(7). <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01618-0>
- Navitha, K. R., & Kousar, H. (2018). A comparative study on the potential of *Aspergillus niger* and *Aspergillus flavus* for the treatment of coffee processing effluent. *International Journal of Environment, Ecology, Family and Urban Studies*, 8(4), 17-22. <https://doi.org/10.24247/ijeeefusaug20182>
- Nur, M. M. A., & Buma, A. G. J. (2019). Opportunities and challenges of microalgal cultivation on wastewater, with special focus on palm oil mill effluent and the production of high value compounds. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2079-2097. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0256-3>

- Palomino, A., Montenegro, L. C., & Godoy, R. D. (2019). Evaluation of yield-predictive models of biocrude from hydrothermal liquefaction of microalgae. *Algal Research*, 44, 101669. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101669>
- Pires, J. F., Viana, D. C., Braga, R. A., Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2021). Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, 278(P2), 111541. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111541>
- Pozzobona, V., Levasseura, W., Guerina, C., Gaveau-Vaillantb, N., Pointchevala, M., & Perréa, P. (2020). *Desmodesmus* sp. pigment and FAME profiles under different illuminations and nitrogen status. *Bioresource Technology Reports*, 10, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100409>
- Rodriguez, N. V., Sanz, J. R., Oliveros, C. E., & Ramirez, C. G. (2015). *Beneficio del café en Colombia*. Federación Nacional de Cafeteros/Cenicafé.
- Safi, C., Camy, S., Frances, C., Montero-Varela, M., Calvo-Badia, E., Pontalier, P., & Vaca-Garcia C. (2014). Extraction of lipids and pigments of *Chlorella vulgaris* by supercritical carbon dioxide: influence of bead milling on extraction performance. *Journal of Applied Phycology*, 26, 1711-1718. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0212-3>
- Sepahri, A., Sarrafzadeh, M. H., & Avateffazeli, M. (2020). Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119164>
- Serrano, L. M., Montenegro, L. C., & Godoy, R. D. (2020). Effect of CO₂ aeration, irradiance, and photoperiod on biomass and lipid accumulation in a microalga autotrophically cultured and selected from four Colombian-native strains. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100578>
- Sun, X., Li, P., Liu, X., Wang, X., Liu, Y., Turaib, A., & Cheng, Z. (2020). Strategies for enhanced lipid production of *Desmodesmus* sp. mutated by atmospheric and room temperature plasma with a new efficient screening method. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119509>
- Wang, Y., Wang, S., Sun, L., Sun, Z., & Li, D. (2020). Screening of a *Chlorella*-bacteria consortium and research on piggery wastewater purification. *Algal Research*, 47, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101840>
- Westblade, L. F., Ranganath, S., Dunne, W. M., Burnham, C. A., Fader, R., & Ford, B. A. (2015). Infection with a chlorophyllic eukaryote after a traumatic freshwater injury. *The New England Journal of Medicine*, 372(10), 982-984.
- Wu, L., Zhu, Q., Yang, L., Li, B., Hu, C., & Lan S. (2018). Nutrient transferring from wastewater to desert through artificial cultivation of desert cyanobacteria. *Bioresource Technology*, 247, 947-953. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.127>
- Yamamoto, M., Nozaki, H., Miyazawa, Y., Koide, T., & Kawano, S. (2003). Relationship between presence of a mother cell wall and speciation in the unicellular microalga *Nannochloris* (Chlorophyta). *Phycology*, 39, 172-184. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2003.02052.x>
- Zhang, Y., Huang, Z., Zheng, H., Wang, Q., & Li, A. (2020). Growth, biochemical composition and photosynthetic performance of *Scenedesmus acuminatus* under different initial sulfur supplies. *Algal Research*, 45, 101728. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101728>

Selección de tecnologías adaptables para la cosecha de cítricos cultivados en ladera en Colombia

Selection of Customizable Technologies for Hillside Citrus Harvesting in Colombia

Daniel Álvarez Arango^a, Carlos Augusto Hincapié Llanos^b

^a Agros Agricultura Inteligente, Colombia.

alvarezdaniel510@gmail.com | <https://orcid.org/0000-0001-7605-8688>

^b Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
carlos.hincapie@upb.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-2652-334X>

RESUMEN

En el presente trabajo se identificaron las principales tecnologías existentes en el mundo para la cosecha de cítricos, especialmente limón Tahití (*Citrus x latifolia* Tanaka Ex Q. Jiménez). A partir de una búsqueda bibliográfica, se establecieron los criterios más importantes para la adaptabilidad de dichas tecnologías a los cultivos en zona de ladera en Colombia. Se revisaron diferentes bases de datos y se identificaron resultados de diversos países con una participación importante en el mercado global de cítricos. Posteriormente, se aplicó un proceso analítico de jerarquización (AHP) para determinar la tecnología más adaptable según los criterios establecidos. Los resultados mostraron como tendencia tecnológica más apropiada la aplicación de soluciones robotizadas para la cosecha de cítricos.

Palabras claves: limón Tahití, *Citrus x latifolia*, cosecha automatizada, cosecha robotizada.

Citation: Álvarez-Arango, D. e Hincapié-Llanos, C. A. (2021). Selección de tecnologías adaptables para la cosecha de cítricos cultivados en ladera en Colombia. *Mutis*, 11(2), 44-55. <https://doi.org/10.21789/22561498.1754>

Recibido: 14 de mayo de 2021. **Aceptado:** 15 de julio de 2021.

Copyright: ©2021. Álvarez-Arango, D. e Hincapié-Llanos, C. A.. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

ABSTRACT

This work identified the main existing technologies for citrus harvesting in the world, especially Tahiti lemon (*Citrus x latifolia* Tanaka Ex Q. Jimenez). Based on a literature review, the most important criteria regarding the adaptability of such technologies to crops planted in hillside terrains in Colombia were established. Different databases were reviewed and results from different countries with an important participation in the global citrus market were identified. Subsequently,

an analytical hierarchy process (AHP) was applied to determine the most adaptable technology according to the established criteria. The results showed that the most appropriate technological trend was the application of robotic solutions for citrus harvesting.

Keywords: Persian lime, *Citrus x latifolia*, automated harvesting, robotic harvesting.

INTRODUCCIÓN

La producción de cítricos en Colombia ha aumentado de forma importante en los últimos años, pasando de 1.124.197 t en 2016 a 1.332.814 t en 2019. Se estima que 47 % de esa producción corresponde a naranjas, 27 % a mandarinas y 26 % a limones (MADR, 2020). En el contexto internacional, los países del hemisferio norte son los mayores productores de cítricos. En cuanto a limones y limas, la producción se concentra principalmente en México (2,87 Mt), La Unión Europea (1,64 Mt), Argentina (1,03 Mt), Turquía (1,03 Mt) y Estados Unidos (940.000 t) (USDA, 2021).

Los cítricos, que comprenden una muy variada gama de especies, son nativos de las regiones tropicales y subtropicales de Asia, desde donde se han dispersado a todo el mundo. Las mayores áreas de cultivo se encuentran en las fajas subtropicales comprendidas entre los 20 y 35 grados de latitud norte-sur (Gómez *et al.*, 2008). La producción de cítricos en Colombia no presenta mayores avances tecnológicos, los métodos de producción empleados son bastante tradicionales y los costos asociados son relativamente altos debido al uso intensivo de mano de obra y a la baja implementación de tecnologías eficientes, entre otros factores. En contraste, otros países ya cuentan con máquinas diseñadas para cosechar, lo cual ha significado un verdadero avance tecnológico, dado que su uso simplifica las labores de corte, separación de impurezas, limpieza, clasificación y empaque, disminuyendo así los elevados costos de las labores de cosecha (Puerta-Polanco, 2007). Debido a la topografía colombiana, especialmente en la región Andina, una parte importante de la producción se lleva a cabo en zonas de ladera, lo que dificulta las labores de automatización el uso de maquinaria. Esta situación conlleva a un estancamiento en el avance tecnológico del sector agrícola, pues la migración de tecnologías de otros países productivos no es, en muchos casos, compatible con las condiciones de producción en Colombia.

El método de recolección de estos productos puede determinar el grado de variabilidad en la madurez y las lesiones físicas, por lo cual esta variable influye en la composición y calidad de los frutos. Los daños mecánicos (abrasiones, rozaduras superficiales y cortes, entre otros) pueden acelerar la pérdida de agua y aumentar la susceptibilidad a los patógenos que causan enfermedades. La incidencia y gravedad de estas lesiones están influenciadas por el método de cosecha (manual frente a mecánica) y la gestión de las operaciones de recolección y manejo (Pássaro *et al.*, 2012).

La oportunidad que tiene Colombia de ser un gran competidor en la producción de cítricos a nivel mundial es evidente. Por tal motivo, es indispensable conocer el estado actual de las tecnologías a nivel global de producción, cosecha y transporte de fruta, al igual que las tendencias en los avances tecnológicos, con el fin de desarrollar o modificar herramientas que se adapten a las necesidades de la producción nacional, aportando a la investigación y al desarrollo agroindustrial (OCDE, 2015). En ese sentido, aprovechar las ventajas comparativas de Colombia, otorgadas por su ubicación geográfica, carencia de estacionalidad y capacidad de producción, requiere incrementar el nivel de competitividad de la producción nacional a través de la disminución de costos de producción y el mejoramiento de la calidad (Aguilar-Niño *et al.*, 2012).

Con base en lo anterior, y teniendo en cuenta el inventario de tecnologías existentes para la cosecha de frutas realizado, el presente estudio busca seleccionar la tecnología adecuada que pueda ser adaptada a los cultivos de cítricos establecidos en zona de ladera del territorio colombiano a través de la realización de una vigilancia tecnológica y la metodología de jerarquización analítica (AHP).

MATERIALES Y MÉTODOS

Vigilancia tecnológica

Para la realización de la vigilancia tecnológica (VT) se ejecutaron los siguientes pasos: (i) identificación del objetivo de la VT, (ii) identificación de las fuentes de consulta, (iii) búsqueda en las fuentes seleccionadas, (iv) análisis y organización de la información y (v) validación de la información. La búsqueda de tecnologías para la cosecha de fruta incorporó los siguientes parámetros, los cuales deben ser considerados para la vigilancia tecnológica en el territorio colombiano, iberoamericano y el mundo: (i) desplazamiento en laderas, (ii) cantidad de operarios para la tecnología y (iii) calidad de la fruta cosechada. Con los criterios anteriores se realizó una búsqueda de información en las bases de datos Scopus y Espacenet Patent Search para el período 2011-2020.

Selección de la tecnología más apta

Con base en la información analizada durante la fase de VT se determinaron ciertos factores que permitieron identificar la adaptabilidad de las tecnologías existentes o las tendencias tecnológicas a las condiciones de cultivo en Colombia. Los resultados fueron analizados a través de la metodología de jerarquización analítica (AHP), desarrollada por Thomas Saaty (2008).

El paso inicial fue la representación gráfica del problema en términos de la selección de la tecnología más apta. Las variables para la selección de la maquinaria se identificaron y seleccionaron a través de la revisión bibliográfica y de visitas de campo, con base en la relevancia que dicha maquinaria tiene para el proceso productivo. Estas variables son:

- Desplazamiento en ladera (D): capacidad de la máquina para avanzar en pendientes empinadas sin afectar su trabajo principal.
- Mano de obra requerida (M): número de trabajadores que la máquina requiere para ser operada y cantidad de mano de obra que esta sustituye en la realización de la labor.
- Calidad de la fruta cosechada (C): en este aspecto se tiene en cuenta el estado físico de la fruta luego de ser cosechada, los daños mecánicos causados y la forma de disponer los frutos a los contenedores para su transporte.

Para la comparación de las tecnologías se utilizó la escala numérica absoluta (tabla 1), la cual permitió determinar qué elemento fue más dominante sobre otro, de acuerdo con los criterios establecidos para la comparación. El procesamiento de la información y la generación de las matrices se desarrolló en hojas de cálculo de Microsoft Excel.

Tabla 1. Escala fundamental de números absolutos

Escala numérica	Descripción
1	Criterios de igual importancia
3	Importancia débil de uno sobre otro
5	Importancia fuerte de uno sobre otro
7	Importancia demostrada de uno sobre otro
9	Importancia absoluta de uno sobre el otro
2	Entre igual y débilmente preferible uno sobre el otro
4	Entre débil y fuertemente preferible uno sobre el otro
6	Entre fuertemente y de importancia demostrada de uno sobre el otro
8	Entre importancia demostrada y extremadamente preferible uno sobre el otro

Fuente: adaptado de Saaty (2008).

RESULTADOS

Vigilancia tecnológica

La tabla 2 presenta las principales ecuaciones de búsqueda utilizadas para realizar la vigilancia tecnológica y el número de resultados obtenido tras su aplicación.

Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda VT período 2011-2022

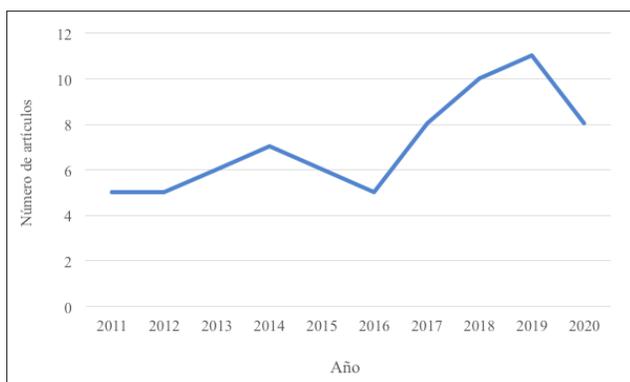
Ecuación de búsqueda	N.º de documentos	Base de datos
TITLE-ABS-KEY ("Fruit harvesting machine" OR "citrus harvesting") OR ("hill harvesting" AND "lime" OR "citrus" OR "technology for harvesting fruit")	71	Scopus
Ecuación de búsqueda	N.º de patentes	Base de datos
"Fruit harvesting machine" OR "citrus harvesting"	144	Espacenet

Fuente: elaboración propia.

Fase de análisis y organización de los resultados

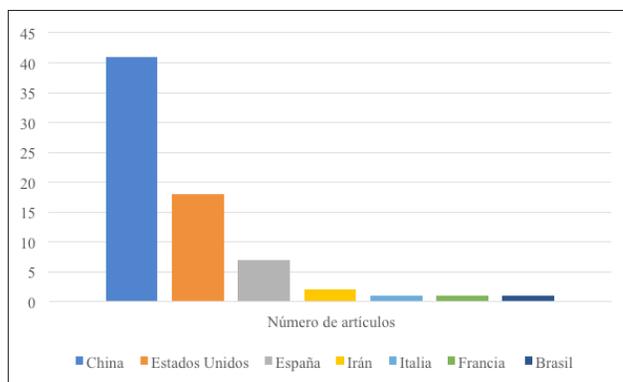
La figura 1 representa la dinámica de publicaciones obtenidas en la base de datos Scopus. Se puede observar un número constante de publicaciones, con un incremento sostenido a partir de 2017 y un leve descenso en 2020. La figura 2 muestra la relación de países con mayor número de publicaciones sobre el tema, donde China (41), Estados Unidos (18) y España (7) ocupan los tres primeros lugares.

Figura 1. Número de artículos identificados por año en Scopus (2011-2020)



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Número de artículos por país (2011-2020)



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se puede observar que China fue el país con mayor número de patentes durante el período de observación, con más del 68 % del total, seguido de España (7 %) y Corea del Sur (6,25 %). Los años con mayor número de patentes publicadas fueron 2014 y 2015, con aproximadamente 46 % del total para el período evaluado. El aumento en ese lapso se debió principalmente al aporte realizado por China, pues el resto de las oficinas de patentes, en conjunto, mantuvieron su tendencia a través de los años.

Tabla 3. Número de patentes por oficina de patentes (2011-2020)

Oficina	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total oficina
CN	1	7	7	22	33	7	2	1	3	15	98
ES	1		4		2	3					10
KR	3		3	2	1						9
US	2	1		2							5
IT		2		2							4
JP	3						1				4
WO	1	1								2	4
AU	1		1			1					3
EP	2		1								3
BR	1										1
EA								1			1
PL				1							1
PT					1						1
Total año	15	11	16	29	37	11	3	2	3	17	144

CN: China; ES: España; KR: Corea del sur; US: Estados Unidos; IT: Italia; JP: Japón; WO: World Intellectual Property Organization (WIPO); AU: Australia; EP: European Patent Office (EPO); BR: Brasil; EA: Eurasian Patent Organization (EAPO); PL: Polonia; PT: Portugal.

Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos de Espacenet Patent Search.

Luego de obtener y validar los resultados de la consulta de las bases de datos y patentes, se seleccionaron los siguientes métodos de cosecha y tecnologías para el análisis comparativo posterior.

Sistemas de cosecha de fruta manual

Como señalan Bassan *et al.* (2013), existen diferentes métodos para cosechar la fruta:

- i. Torsión (Tr): la fruta es sujeta cuidadosamente con la mano y se estira a la vez que se le aplica una ligera torsión para removerla del árbol.
- ii. Tijeras (Tj): se realiza la escisión del pedúnculo con la ayuda de las tijeras, seguido de una selección manual.
- iii. Canasta cosechadora (Cc): consiste de una canasta metálica o un saco de tela con garras en la parte

superior que se encarga de la separación de la fruta del árbol.

- iv. Gancho (G): la fruta es removida con la ayuda de un gancho, dejándola caer al suelo para luego ser recolectada manualmente.

Sistemas de cosecha de fruta mecanizada

La cosecha mecanizada de fruta ha sido investigada y aplicada desde los años 60 del siglo 20 (Coppock, 1961). Los métodos más usados son:

- i. Sacudidora de ramas (Sr): funciona gracias a un peso retirado del centro de un eje que es rotado para producir un movimiento vibratorio y que es ubicado en las ramas del árbol a través de un mecanismo de agarre. Se ha determinado que este método causa daños mecánicos notables en las ramas del árbol, como cortes totales o parciales, además de no ser muy eficiente, pues causa

caída del follaje y de fruta no madura (Hedden & Coppock, 1968).

- ii. Sacudidora de copa lateral (Sc) o *canopy shaker*: se fija a las ramas secundarias del árbol y provoca un movimiento vibratorio vertical, buscando minimizar los daños ocasionados, principalmente en la fruta y el árbol, y aumentar el porcentaje de fruta cosechada (Futch & Roka, 2005). Luego de que la fruta cae al piso, se requiere de mano de obra para terminar de recolectarla, ya sea en vehículos adaptados para el cargue o en canastas plásticas. Este sistema puede ser autopropulsado o adaptado a un tractor.

Sistemas de cosecha de fruta automatizados

Los sistemas de cosecha mecanizados no tienen la posibilidad de mantener la calidad de la fruta como lo puede hacer el ojo humano. Por lo tanto, se consideró el desarrollo de cosechadoras automatizadas individuales de fruta que realizan la interpretación de patrones a través de imágenes capturadas por cámaras. Por ejemplo, en Francia se desarrolló el proyecto MAGALI, donde una cámara se fija en el camino del dispositivo para detectar las frutas en el árbol, enviando la señal a un brazo mecánico que se encarga de cosechar la fruta con una trayectoria lineal. Este proyecto fue suspendido en 1996/97 debido a que no cumplía con los criterios necesarios para la viabilidad comercial (Ward, 2003). Por su parte, el Proyecto Eureka contaba con un agarrador esférico y una cámara a blanco y negro con filtros de onda de 560 nm. La detección de las frutas maduras se realizaba por medio de un clasificador bayesiano, aunque presentaba problemas en la detección de la distancia para el agarre de la fruta.

El principal programa de cosecha robotizada a nivel mundial comenzó en la Universidad de Florida (Estados Unidos) en 1980 (Bachche, 2015). Posteriormente, numerosas investigaciones alrededor del mundo han estudiado soluciones robóticas para la cosecha de frutas y vegetales frescos, y algunas empresas han desarrollado modelos funcionales que han lanzado al mercado. Por ejemplo, en Reino Unido, la empresa DogTooth creó un robot capaz de cosechar fresas autónomamente a través del cultivo, seleccionarlas y ubicarlas en los contenedores que serán vendidos. La *startup* Abundant Robotics, ubicada en California (Estados Unidos), ha desarrollado

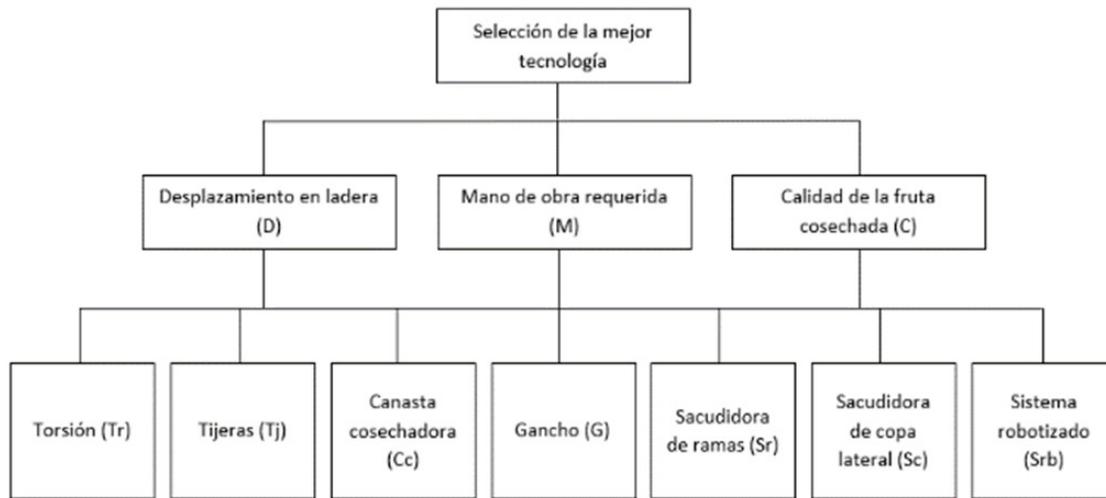
un robot capaz de cosechar manzanas por medio de vacíos. Este robot usa algoritmos de visión artificial para ubicar las manzanas en los árboles y posteriormente colectarlas en canastillas. Por otra parte, la empresa estadounidense FFRobotics desarrolló un robot capaz de reducir el costo de mano de obra para la recolección de la fruta, el cual cuenta con un sistema avanzado de procesamiento de imágenes y una pinza en forma de mano para la cosecha de la fruta. Todos estos avances funcionan principalmente con un sistema de detección del fruto, que puede ser una cámara combinada con un sensor de distancia, un brazo robótico multi ejes que le da facilidad de movimiento para llegar al fruto y un dispositivo cosechador, como un par de pinzas, la boca de una aspiradora, tijeras o una mano robótica (Mehta & Burks, 2014).

Existen patentes de sistemas robotizados (Srb) de cosecha, tales como el brazo robótico para la recolección de frutos con sensor de distancia para detección de fruta, creado por la empresa Kubota Ltda., ubicada en Osaka, Japón (Takashi, 1984), el robot con cinco ejes de movimiento, vehículo incorporado y sistema de control que permite la recolección de cítricos a través de un par de pinzas (Qinghai, 2017), y el sistema de recolección de fruta por medio de un vehículo que cuenta con un aparato vibratorio (Cui *et al.*, 2010) a power supply (2, por citar los ejemplos más sobresalientes.

DISCUSIÓN

La figura 3 presenta la jerarquía de los criterios definidos para el análisis de selección. En la parte superior de la figura se encuentra el objeto de análisis, mientras que en la parte inferior se ubican los criterios y las alternativas a considerar. En el proceso de selección se determinaron las necesidades básicas de los cultivos de cítricos colombianos y las tecnologías potenciales a ser implementadas. Como resultado, se identificaron las variables Torsión (Tr), Tijeras (Tj), Canasta Cosechadora (Cc), Gancho (G), Sacudidora de ramas (Sr), Sacudidora de copa lateral (Sc) y Sistemas Robotizados (Sr). Luego de analizar el funcionamiento de los sistemas robotizados, se concluyó que no varía mucho el rendimiento, método de cosecha y funcionamiento por la similitud en que son construidos. Por ende, todos los tipos de robots se agrupan en esta variable con el objetivo de facilitar su análisis.

Figura 3. Jerarquización y objeto de análisis



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las revisiones realizadas, los agricultores consideran que el criterio más importante para la selección de una tecnología es la mano de obra, pues esta representa su mayor problema debido a la creciente escasez de fuerza laboral en las zonas rurales del país, su baja calificación, inestabilidad y ciertos problemas en materia laboral. Por lo tanto, en la matriz de análisis se estableció este criterio con un mayor peso frente a los demás, seguido del desplazamiento en ladera y la calidad de la fruta cosechada. En la tabla 3 se pueden observar los valores asignados y organizados de acuerdo a la metodología AHP (Saaty, 2008). Por ejemplo, en la fila M, columna D, se asignó un valor de cuatro (4,00) mientras que en la localización inversa (fila D, columna M) se asignó el valor inverso (1/4), y así sucesivamente hasta completar la tabla. En la tabla 5 puede verse la normalización de la matriz de la tabla 4 y en la última columna la ponderación de cada criterio. Este valor representa el nivel de importancia que tiene cada uno de los criterios para el agricultor. Así, cada criterio afectó la elección de cualquier alternativa, por lo que se evaluó la relevancia que tiene cada uno de estos para el objeto del análisis.

Tabla 4. Comparación de los criterios apareados

	D	M	C
D	1,00	0,25	2,00
M	4,00	1,00	0,50
C	0,50	2,00	1,00

D: desplazamiento en ladera; M: mano de obra requerida; C: calidad de la fruta cosechada.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Matriz normalizada de comparación de criterios apareados

	D	M	C	Peso
D	0,18	0,08	0,57	0,21
M	0,73	0,31	0,14	0,39
C	0,09	0,62	0,29	0,39

D: desplazamiento en ladera; M: mano de obra requerida; C: calidad de la fruta cosechada.

Fuente: elaboración propia.

Haciendo uso de la escala presentada en la tabla 1 se evaluó nuevamente cada criterio con el fin de comparar las alternativas. La tabla 6 fue calculada de igual forma que la tabla 5, pero considerando el desplazamiento en ladera (D) como criterio principal en cada alternativa; las demás alternativas se evaluaron de

la misma manera. En la tabla 7 se evaluó la alternativa con el criterio de mano de obra requerida (M) y en la tabla 8 con el criterio de calidad de la fruta (C). Adicionalmente, en la última columna se expuso el peso o ponderación del criterio sobre el que está siendo evaluado.

Tabla 6. Matriz A_D tecnologías comparada con desplazamiento en ladera (D)

	Tr	Tj	Cc	G	Sr	Sc	Srb	Peso
Tr	1	1	1	1	3	5	2	0,20
Tj	1	1	1	1	3	5	3	0,21
Cc	0,33	1	1	1	3	5	3	0,19
G	0,33	1	1	1	1	5	3	0,17
Sr	0,33	0,33	0,33	1	1	5	0	0,10
Sc	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	1	0,33	0,04
Srb	0,50	0,33	0,20	0,33	3,00	3,00	1	0,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Matriz A_M comparada con mano de obra requerida (M)

	Tr	Tj	Cc	G	Sr	Sc	Srb	Peso
Tr	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
Tj	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
Cc	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
G	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
Sr	3,00	3,00	3,00	3,00	1,00	0,33	0,11	0,10
Sc	7,00	7,00	7,00	7,00	3,00	1,00	0,33	0,26
Srb	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	3,00	1,00	0,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Matriz A_C tecnología comparada con calidad de la fruta (C)

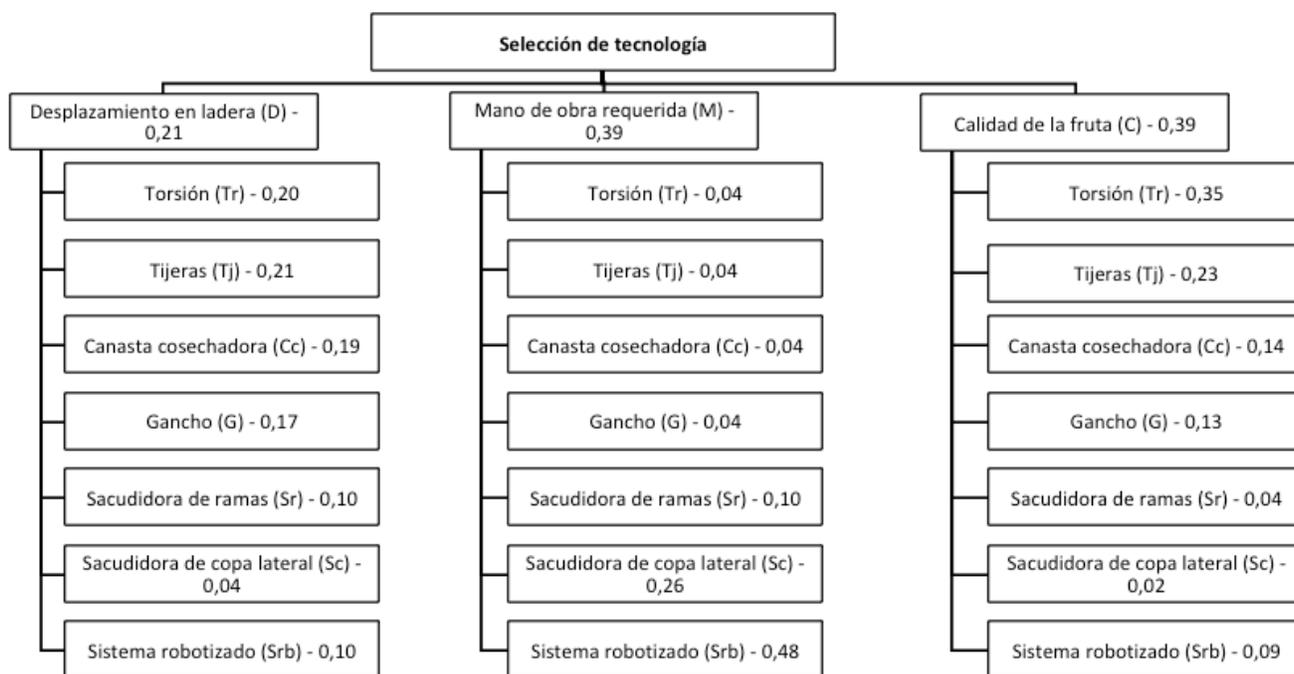
	Tr	Tj	Cc	G	Sr	Sc	Srb	Peso
Tr	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00	9,00	3,00	0,35
Tj	0,33	1,00	3,00	3,00	7,00	9,00	3,00	0,23
Cc	0,33	0,33	1,00	1,00	5,00	7,00	3,00	0,14
G	0,20	0,33	1,00	1,00	5,00	7,00	3,00	0,13
Sr	0,14	0,14	0,20	0,20	1,00	3,00	0,33	0,04
Sc	0,11	0,11	0,14	0,14	0,33	1,00	0,14	0,02
Srb	0,33	0,33	0,33	0,33	3,00	7,00	1,00	0,09

Fuente: elaboración propia.

La información obtenida de las tablas anteriores se compiló y se ordenó en la representación gráfica de la solución AHP, como se muestra en la figura 4. Con

los datos obtenidos se analizaron las alternativas, realizando una multiplicación de la ponderación en cada criterio respecto al objetivo.

Figura 4. Matriz de Solución AHP



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, después de evaluar la afectación de cada criterio con el objeto de análisis y de realizar la multiplicación de los valores ponderados de cada variable, se obtuvieron los resultados descritos en la tabla 9. De esta manera, se encontró que el sistema robotizado es el más apropiado para la cosecha de cítricos en ladera, de acuerdo con los criterios evaluados y las condiciones existentes en la región. Los sistemas robotizados para cosechas de cítricos han sido ampliamente evaluados y usados alrededor del mundo, especialmente en terrenos planos (Ferreira *et al.*, 2018).

Tabla 9. Resultados análisis de jerarquización

Método de cosecha	Calificación
Sistema robotizado (Srb)	0,24
Torsión (Tr)	0,20
Tijeras (Tj)	0,15
Sacudidora de copa lateral (Sc)	0,12
Canasta cosechadora (Cc)	0,11
Gancho (G)	0,10
Sacudidora de ramas (Sr)	0,08

Fuente: elaboración propia.

La automatización de procesos como la cosecha de frutas es un reto. Sin embargo, existen esfuerzos importantes en temas como la visión para la detección de frutos (Aloisio *et al.*, 2012; Cubero *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2011; Mehta & Burks, 2014) y la integración con el *Internet of things* (IoT) (Li *et al.*, 2016). Este tipo de sistemas cada vez son más asequibles, especialmente por el uso de dispositivos móviles para la ejecución de algunas de las funciones necesarias para el proceso, como la detección de la madurez de la fruta y su localización (Cubero *et al.*, 2014; Ferreira *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2018; Vidal *et al.*, 2013). No obstante, aún se requieren avances en el diseño y la construcción de este tipo de dispositivos para la cosecha en zonas de ladera, puesto que en los principales países desarrolladores de estas tecnologías (ver figura 2) los cultivos se siembran en terrenos planos, lo cual se evidenció en la ausencia de literatura y patentes para terrenos de ladera.

Es claro que los costos iniciales del sistema robotizado son sustancialmente mayores con respecto a las otras alternativas. Sin embargo, los métodos manuales presentan gastos variables (salarios y prestaciones) de forma continua en el tiempo, mientras que un sistema robotizado requiere una alta inversión inicial y costos de mantenimiento por un período significativo. Por lo tanto, es vital comparar y evaluar cada caso de manera particular y no establecer una conclusión definitiva al respecto. Es importante resaltar que en el mundo se están realizando esfuerzos por buscar alternativas de cosecha automatizada a precios razonables y que los precios de este tipo de tecnología cada vez son menores (Kuznetsova, 2020).

CONCLUSIONES

Los países industrializados donde se cultivan cítricos son los mayores generadores de publicaciones y patentes sobre tecnologías para la cosecha de estos productos agrícolas. Por sus condiciones topográficas, las tecnologías en automatización de procesos de cosecha de frutas son enfocadas hacia el terreno plano, por lo que el conocimiento que se genera para terrenos de ladera es prácticamente inexistente.

Luego de haber aplicado el proceso analítico se concluyó que la implementación del sistema robotizado (Srb) es potencialmente la mejor opción para los cultivos de cítricos desarrollados en ladera en

Colombia. Aunque el sistema de cosecha por torsión dio un muy buen resultado, es importante tener en cuenta que al implementar robots se puede incrementar la productividad, pues estos pueden trabajar a un ritmo constante y más horas al día, sin sufrir fatiga o cansancio. Recordando que una de las principales problemáticas del sector es la consecución de mano de obra temporal calificada para el momento de la cosecha, el Srb podría ser una solución a este problema.

El desarrollo del sector cítrico colombiano debe tener como mira la investigación de la aplicabilidad de la robótica en el campo, pues las condiciones topográficas de los cultivos tradicionales en Colombia no permiten la adaptación de maquinaria arrastrada por tractores, como sucede en otros países.

Se recomienda, para futuras investigaciones, realizar un estudio económico que permita determinar la factibilidad financiera en el largo plazo de la alternativa seleccionada.

REFERENCIAS

- Aguilar-Niño, P., Escobar-Quijano, M. J., & Pássaro-Carvalho, C. P. (2012). Situación actual de la cadena de cítricos en Colombia: limitantes y perspectivas. En L. F. Garcés-Giraldo (ed.), *Cítricos: cultivo, poscosecha e industrialización* (pp. 7-47). Corporación Universitaria Lasallista.
- Aloisio, C., Mishra, R. K., Chang, C. Y., & English, J. (2012). Next generation image guided citrus fruit picker. *2012 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2012*, 37-41. <https://doi.org/10.1109/TePRA.2012.6215651>
- Bachche, S. (2015). Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: A survey. *Robotics, 4*(2), 194-222. <https://doi.org/10.3390/robotics4020194>
- Bassan, M. M., Mourão-Filho, F. A. A., Caron, V. C., Couto, H. T. Z., & Jacomino, A. P. (2013). The harvesting system affects the quality and conservation of the 'Tahiti' acid lime. *Scientia Horticulturae, 155*, 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.03.008>

- Coppock, G. (1961). Picking citrus fruit by mechanical means. *Florida State Horticultural Society Proceedings*, 1362, 247-251. <https://journals.flvc.org/fshs/article/download/101013/96957>
- Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., García-Navarrete, O., & Blasco, J. (2014). Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precision Agriculture*, 15(1), 80-94. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9324-7>
- Cubero, S., Lee, W. S., Aleixos, N., Albert, F., & Blasco, J. (2016). Automated systems based on machine vision for inspecting citrus fruits from the field to postharvest — A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 1623-1639. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1767-1>
- Cui, H., Zhou, H., Xu, L., & Cui, Y. (2010). CN101982039A. Nantong Guangyi Electromechanical Co. Ltd, China.
- Ferreira, M. D., Sanchez, A. C., Braunbeck, O. A., & Santos, E. A. (2018). Harvesting fruits using a mobile platform: A case study applied to citrus. *Engenharia Agricola*, 38(2), 293-299. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n2p293-299/2018>
- Futch, S. H., & Roka, F. M. (2005). *Continuous canopy shake mechanical harvesting systems*. University of Florida. <https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/IR/00/00/27/32/00001/HS23900.pdf>
- Gómez, B. G., Caicedo, A. A., & Gil, V. L. F. (comp.) (2008). *Tecnología para el cultivo de cítricos en la región Caribe colombiana*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <https://doi.org/10.21930/978-958-8311-91-3>
- Hedden, S., & Coppock, G. (1968). Effects of the tree shaker harvest system on subsequent citrus yields. *Florida State Horticultural Society Proceedings*, 81, 48-52. <http://journals.fcla.edu/fshs/article/viewFile/99937/95907>
- Kuznetsova, A. A. (2020). Rational Pricing of fruit-harvesting robots. *Proceedings of 13th International Conference Management of Large-Scale System Development, MLSD 2020*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/MLSD49919.2020.9247787>
- Li, B., Zhou, A., Yang, C., & Zheng, S. (2016). The design and realization of fruit harvesting robot based on IOT. *Proceedings of the 2016 International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA), 2016*. <https://doi.org/10.2991/iccia-16.2016.29>
- Li, P., Lee, S. H., & Hsu, H. Y. (2011). Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems. *Procedia Engineering*, 23, 351-366. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2514>
- Mehta, S. S., & Burks, T. F. (2014). Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 102, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.01.003>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2020). *Cadena del cítricos, Indicadores e instrumentos. Primer semestre 2020*. MADR. [https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2020-03-30 Cifras Sectoriales.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2020-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf)
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2015). *Revisión de la OCDE de las políticas agrícolas: Colombia 2015*. OCDE. <https://www.oecd.org/colombia/Colombia-Revision-OCDE-Políticas-Agrícolas-2015.pdf>
- Pássaro, C., Navarro, P., & Aguilar, A. (2012). Poscosecha. En L. F. Garcés-Giraldo (Ed.), *Cítricos: cultivo, poscosecha e industrialización* (pp. 223-284). Corporación Universitaria Lasallista.
- Peng, H., Shao, Y., Hu, Y., Wu, D., Chen, Y., & Lin, G. (2018). Maturity analysis of citrus based on machine vision and android mobile platform technology. *Proceedings 3rd International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City (ICITBS), 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICITBS.2018.00088>
- Puerta-Polanco, F. M. (2007). *Maquinaria y mecanización agrícola*. UNAD. <https://www.academia.edu/download/53141885/201619.pdf>

- Qinghai, L. (2017). CN108076832A. China.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Takashi, T. (1984). US4663925A. Kubota Corp, EE. UU.
- United States Department of Agriculture [USDA]. (2021). *Citrus: world markets and trade*. USDA. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Citrus.pdf>
- Vidal, A., Talens, P., Prats-Montalbán, J. M., Cubero, S., Albert, F., & Blasco, J. (2013). In-line estimation of the standard colour index of citrus fruits using a computer vision system developed for a mobile platform. *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3412-3419. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1015-2>
- Ward, G. (2003). *New mechanical and robotic harvesting technologies to increase fruit production efficiency*. Department of Agriculture, Government of Western Australia.

Reducción de la concentración de DQO y COT en aguas residuales de la industria farmacéutica empleando ozono catalizado por Fe^{2+} . Estudio de caso a escala real

Reduction of the Concentration of COD and TOC in Wastewater from the Pharmaceutical Industry Using Ozone Catalyzed by Fe^{2+} . Full-scale Case Study

Camila Pedreros Calvo^{ad}, Kelly Viviana Valderrama López^{ae}, Rafael Nikolay Agudelo Valencia^{af}, Karina Pérez Cortés^{bg}, Carlos Enrique Campo^{ch}

^a Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Colombia.

^b Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

^c Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Colombia.

^d <https://orcid.org/0000-0001-6657-7708>

^e <https://orcid.org/0000-0003-1904-3732>

^f rafaeln.agudelov@unilivre.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-6646-7725>

^g <https://orcid.org/0000-0002-5854-7477>

^h <https://orcid.org/0000-0002-2629-8621>

Citation: Pedreros-Calvo, C., Valderrama-López, K. V., Agudelo-Valencia, R. N., Pérez-Cortés, K. y Campo, C. E. (2021). Reducción de la concentración de DQO y COT en aguas residuales de la industria farmacéutica empleando ozono catalizado por Fe^{2+} . Estudio de caso a escala real. *Mutis*, 11(2), 56-63. <https://doi.org/10.21789/22561498.1707>

Recibido: 17 de diciembre de 2020. **Aceptado:** 15 de marzo de 2021.

Copyright: ©2021. Pedreros-Calvo, C., Valderrama-López, K. V., Agudelo-Valencia, R. N., Pérez-Cortés, K. y Campo, C. E. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

RESUMEN

El presente trabajo fue realizado con el fin de mejorar el desempeño de un sistema de ozonización utilizado para el tratamiento de aguas residuales en una industria farmacéutica. Con el objeto de mejorar la mineralización de la materia orgánica, se aplicó como catalizador sulfato ferroso al sistema de reacción. Seguido de esto, se ajustó el pH del agua entre 8,5 y 10 para que el proceso se lleve a cabo en condiciones alcalinas. Finalmente, se inyectó O_3 a través de un tubo Venturi con el fin de mejorar el intercambio de masa entre el gas y el agua. Los datos preliminares



de operación del sistema de tratamiento señalan que este alcanza remociones de demanda química de oxígeno (DQO) menores a 10 %. Los ensayos fueron realizados a escala real y las variables de calidad del agua fueron analizadas a diferentes tiempos de reacción. Se determinó que para una dosis de ozono igual a 10 g/h y 10 mg/L de Fe^{2+} y un pH inicial del agua igual a 9 se requieren de 4,5 horas a fin de lograr una reducción de 30,73 % de DQO y 36,85 % de carbón orgánico total (COT). Los resultados realizados con un pH inicial superior a 9,5 señalan que la efectividad del proceso se reduce, hecho que puede ser ocasionado por la rápida formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ insoluble, con lo cual disminuye la disponibilidad del catalizador para la formación de radicales OH^* en el agua.

Palabras clave: ozono, procesos de oxidación avanzada, catalizador, DQO, COT, agua residual farmacéutica.

ABSTRACT

This work was carried out to improve the performance of an ozonation system used for wastewater treatment in the pharmaceutical industry. Ferrous sulfate was applied as a catalyst to the reaction system in order to improve the mineralization of organic matter. After this, the pH of the water was adjusted to 8.5-10 so that the process flows under alkaline conditions. Finally, O_3 was injected through a Venturi tube to improve the mass exchange between gas and water. Preliminary data on the operation of the treatment system indicate a COD removal of less than 10%. The tests were carried out at full scale and the water quality variables were analyzed at different reaction times. Results allowed us to determine that an ozone dose equal to 10 g/h and 10 mg/L of Fe^{2+} and an initial pH of water of 9 require a total of 4.5 hours to achieve a 30.73% reduction of COD and 36.85% reduction of TOC. The results obtained at an initial pH higher than 9.5 indicate that the effectiveness of the process is lowered under this condition, which may be due to the rapid formation of insoluble $\text{Fe}(\text{OH})_3$, thus reducing the availability of catalyst for the formation of OH^* radicals in the water.

Keywords: Ozone, advanced oxidation processes, catalyst, COD, TOC, pharmaceutical wastewater.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los cuerpos de agua dulce, sumada al aumento en la demanda de agua limpia, da lugar a serios problemas para la humanidad. A su vez, el aumento poblacional es la causa de la creciente contaminación de las aguas dulces. Por otra parte, el consumo de agua sin un adecuado tratamiento ocasiona la muerte de miles de personas a nivel mundial (Chandak *et al.*, 2020). Son múltiples las fuentes de contaminación en el agua, entre ellas se pueden señalar las aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias, además del incremento de la producción industrial.

El desarrollo de nuevas categorías de productos ha transformado los procesos de producción industrial, con lo cual ha aumentado la complejidad de las aguas residuales generadas por la industria (Lalwani *et al.*, 2020). Dentro de la categoría de nuevos productos se puede mencionar los de tipo farmacéutico, compuestos que juegan un papel importante en la calidad y esperanza de vida de la humanidad (Zaied

et al., 2020). La liberación de productos farmacéuticos en el ambiente representa un problema ecotoxicológico, puesto que son sustancias diseñadas para inducir una respuesta biológica (Olvera-Vargas *et al.*, 2021). La presencia de estos compuestos en el agua tiene dos fuentes principales, la fabricación de productos farmacéuticos y el uso común de estos, hecho que se refleja en las aguas residuales domésticas, agrícolas, pecuarias y hospitalarias (Zaied *et al.*, 2020).

Las empresas farmacéuticas constantemente producen una amplia variedad de productos orgánicos con estructuras complejas y baja biodegradabilidad. Además, los procesos de elaboración de estas sustancias son llevados a cabo por lotes, situación que da como resultado aguas residuales de composición compleja y fuertes fluctuaciones en la concentración de contaminantes (Ling *et al.*, 2020). La baja biodegradabilidad de estos productos hace que las aguas residuales que los contienen presenten bajos valores de DBO y altos valores de DQO, lo cual representa un inconveniente para el tratamiento

biológico de dichas aguas, puesto que los compuestos químicos recalcitrantes pueden restringir la actividad de los microorganismos (Başaran-Dindaş *et al.*, 2020). De esta manera, las aguas residuales generadas por las empresas farmacéuticas tienden a ser refractarias a la mayoría de las técnicas de tratamiento físico, químico y biológico convencionales. Por lo tanto, se hace necesaria la búsqueda de alternativas de tratamiento encaminadas a generar condiciones fuertemente oxidantes en condiciones ambiente para lograr la ruptura y posterior mineralización de los contaminantes orgánicos disueltos (Lalwani *et al.*, 2020).

Con el fin de lograr las condiciones planteadas anteriormente, los procesos de oxidación avanzada (POA) representan una alternativa que permite la mineralización de compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en el agua residual por la acción de radicales OH^{*}, los cuales tiene alto poder oxidante y no son selectivos (Rekhate & Srivastava, 2020). Los POA hacen uso del reactivo de Fenton, peróxido de hidrógeno, ozono y fotocatalisis para producir radicales OH^{*}. Estos reactivos pueden ser empleados en presencia de luz ultravioleta (UV), catalizadores y ultrasonido para acelerar e intensificar los POA, los cuales pueden ser clasificados principalmente en cuatro grupos: (i) procesos fotocatalíticos (H₂O₂/UV, O₃/H₂O₂/UV, UV/TiO₂, H₂O₂/TiO₂/UV, O₃/TiO₂/UV); (ii) procesos con base en el reactivo de Fenton (Fe²⁺/H₂O₂, Fe²⁺/H₂O₂/UV, electrofenton); (iii) procesos con base en ozono (O₃/UV, O₃/H₂O₂, O₃/Fe²⁺, O₃/óxido metálico como catalizador, O₃/carbón activado, O₃/ultrasonido); y (iv) otros procesos que involucran persulfato y radiación ionizante (Rekhate & Srivastava, 2020).

La popularidad del uso de ozono para el tratamiento de aguas residuales ha incrementado en las últimas décadas debido a que sus costos de producción han disminuido y a que este no genera iones disueltos tras su aplicación y descomposición. Las tecnologías comerciales para la generación de ozono se fundamentan en la descarga por efecto corona a una corriente seca de gas (O₂ o aire). El modo de degradación de contaminantes puede ocurrir por dos rutas: ataque electrofílico directo del ozono molecular y ataque indirecto por radicales OH^{*} generados a través de las reacciones de descomposición del ozono en el agua. Al respecto, aunque se ha observado que elevar la dosis

de ozono incrementa la tasa de degradación de algunos contaminantes, este efecto no es notorio en la degradación de contaminantes recalcitrantes (Rekhate & Srivastava, 2020).

Como parte de los beneficios del uso de ozono para el tratamiento de aguas residuales se puede mencionar la reducción de la cantidad de lodos generados y la remoción de contaminantes persistentes. De manera similar a la reacción de Fenton, la adición de un catalizador al proceso de ozonización promueve la descomposición del oxidante (O₃) para generar radicales libres activos, tales como el OH^{*}. De manera que, al compararla con otros procesos de ozonización, la ozonización catalítica puede reducir los costos de operación al no incurrir en otros costos energéticos (radiación UV). Así mismo, en la mayoría de los casos, la ozonización catalítica ha mostrado mejor desempeño en la mineralización de contaminantes que la ozonización por sí sola (Wang *et al.*, 2018; Wang & Chen, 2020).

Con el fin de incrementar la reactividad del O₃ con enlaces saturados de las moléculas de materia orgánica se debe procurar la descomposición de este para formar radicales OH^{*} por la reacción con iones OH (Braga *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2015), es decir, se debe procurar que el pH del agua sea alcalino. Sumado a esto, para descomponer el O₃ e incrementar la generación de radicales OH^{*} se debe implementar sulfato ferroso, ya que esto permite que el Fe²⁺ actúe como catalizador y con ello lograr un mayor desempeño del ozono como agente oxidante para la materia orgánica presente en el agua.

De manera análoga, un aspecto de especial interés en los productos orgánicos volátiles (POV) que emplean ozono es la transferencia de masa de la corriente gaseosa (mezcla aire/O₃) que se inyecta hacia el agua. En el presente estudio de caso se empleó un tubo Venturi con el objeto de realizar la inyección del ozono en la garganta de este, punto en el cual, por la reducción del área de flujo, la caída de presión y el aumento de velocidad del agua generan la succión del gas. Una vez inyectada la mezcla aire/O₃, la considerable turbulencia y recuperación de presión de flujo permiten incrementar la transferencia de masa. El punto de succión en el Venturi también fue empleado para dosificar el catalizador.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto fue llevado a cabo en las instalaciones de una empresa farmacéutica ubicada en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Los ensayos fueron realizados a escala real, en un tanque cilíndrico (1,8 m de diámetro y 2,4 m de altura útil) con capacidad de 6,1 m³. En dicha empresa las aguas residuales domésticas e industriales son tratadas por separado. El agua residual industrial se recibe en un tanque de homogenización con agitación mecánica. Posteriormente, el agua se clarifica en un sistema de coagulación, floculación y sedimentación de alta tasa. Luego, el agua clarificada se introduce al tanque de oxidación, mencionado previamente. En este último el agua recibe la adición de ozono, para lo cual se hace uso de un generador de ozono por efecto corona (Flygoo Eco-Technologies) y un compresor que permite que la mezcla aire/ozono ingrese por el fondo de este y reaccione con la materia orgánica. La operación del tanque de oxidación con ozono y todo el sistema de tratamiento se realiza por lotes.

Con base en los resultados obtenidos a la fecha de realización del presente proyecto, el sistema de oxidación solo alcanzaba a remover 10 % de la DQO. Por lo anterior, se realizaron las siguientes modificaciones. En primer lugar, se instaló una bomba de 745,7 W, la cual succiona agua del fondo del tanque de oxidación. En la salida de la bomba fue instalado un tubo Venturi de 1 pulgada de diámetro de entrada y una reducción a 0,5 pulgadas en la garganta. Posteriormente, el agua se retorna al fondo del tanque y es distribuida por medio de tuberías perforadas. La pérdida de carga en el Venturi se utilizó para realizar la inyección del ozono al proceso. Así, la turbulencia en la garganta del Venturi ocasiona el aumento de velocidad y la presión en la tubería favorece la dilución del ozono en el agua. Además, el retorno del agua por el fondo del tanque mejora la transferencia de masa O₃/agua (Mainardis *et al.*, 2020). Las características de los ensayos realizados a escala real se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones en las cuales fue realizado cada uno de los ensayos

Día	pH inicial del agua	Dosis de Fe ²⁺ (mg/L)	Dosis de O ₃ (g/h)	Volumen de agua tratada (m ³)	Tiempo de reacción (horas)
1	8,5	5	10	6,1	3,5
2	9,0	5	10	6,1	4,5
3	9,0	10	10	6,1	2
4	9,5	10	10	6,1	5
5	10,0	10	10	3,05	4

Fuente: elaboración propia.

La fuente de Fe²⁺ para catalizar el proceso fue sulfato ferroso con 95 % de pureza. Los análisis de pH, conductividad, DQO y COT fueron realizados de acuerdo con los protocolos establecidos en los métodos estándar para el análisis de agua potable y residual. El proyecto se desarrolló con el propósito de evaluar la ozonización catalítica y mejorar la mineralización de la

materia orgánica presente en el agua residual en términos de DQO y COT. A lo largo de cada ensayo se tomaron muestras cada 1 h de reacción y para con ello analizar la tendencia cinética del proceso que logró la mayor efectividad de reducción de concentración de DQO y COT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos fueron realizados a escala real por un período de 5 días. En la tabla 2 aparecen los resultados obtenidos en cada ensayo realizado.

Tabla 2. Resultados experimentales

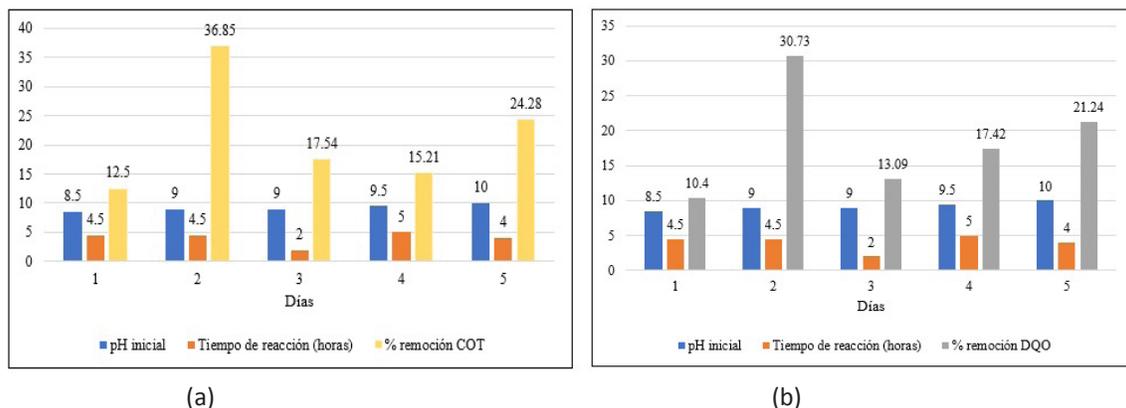
Día	pH inicial	Tiempo de reacción (horas)	DQO Inicial (mg/L)	COT inicial (mg/L)	pH final	DQO final (mg/L)	COT final (mg/L)
1	8,5	4,5	404,00	115,42	8,1	362,00	101,00
2	9,0	4,5	423,00	130,85	8,6	293,00	82,64
3	9,0	2	359,00	102,10	8,6	312,00	84,19
4	9,5	5	333,00	102,00	8,7	275,00	86,49
5	10,0	4	457,70	148,70	9,7	360,50	112,60

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos de reacción son diferentes en algunos ensayos debido a condiciones operativas en planta. A pesar de ello, esa situación es útil para analizar la influencia del tiempo de reacción y por lo tanto la dosis de ozono aplicada sobre el proceso. En la tabla 2 se puede observar que la concentración inicial fue variable; por ello, el análisis de resultados fue realizado en términos de porcentaje de remoción de DQO y COT. Sin embargo, también se observa que el pH del agua

disminuye, situación que puede ser ocasionada por la formación de especies orgánicas oxidadas (ácidos orgánicos) y por la formación y dilución de CO₂ en el agua producto de la completa mineralización de la materia orgánica. La reducción de COT en todos los ensayos permite confirmar la mineralización de una porción de la materia orgánica presente en el agua residual. En la figura 1 se presentan los porcentajes de remoción de DQO y COT alcanzados en cada experimento.

Figura 1. Porcentajes de remoción alcanzado en los ensayos realizados para DQO (a) y COT (b)



Fuente: elaboración propia.

Al comparar los resultados de los ensayos con el mismo tiempo de retención (día 1 y 2) se observa que cuando el pH inicial del agua es 9 se alcanza mayor remoción para DQO (30,71 %) y COT (36,8 %), lo cual se explica por la mayor presencia de iones OH⁻ para promover la formación de radicales OH^{*} como efecto de las reacciones de descomposición de O₃. Por otra parte, si se comparan los resultados del día 2 y día 5, los cuales fueron realizados con tiempos de retención similares, se aprecia que la remoción a pH inicial 9 es mayor que a pH inicial 10. Las condiciones para este último ensayo varían, puesto que el volumen de agua tratado fue de 3,05 m³, con un tiempo de reacción de 0,5 horas más. Así, la dosis de ozono fue mayor en este ensayo, aunque a pesar de ello la remoción de DQO y COT resultó ser menor. Dicha situación puede ser explicada debido a que el catalizador (Fe²⁺) se oxida a Fe³⁺ y para un valor de pH (10) tan alto la concentración de iones OH⁻ es suficientemente alta como para formar con rapidez Fe(OH)₃, con lo cual la cantidad de catalizador disponible para la reacción se reduce y disminuye la tasa de formación de los radicales OH^{*} necesarios para la completa oxidación de la materia orgánica. Lo mismo ocurre al comparar los resultados de los ensayos de los días 2 y 4, puesto que el valor inicial de pH en el ensayo del día 5 es un poco superior que para el día 2, aunque el tiempo de reacción es 0,5 horas mayor. De esa manera es posible explicar la reducción de la efectividad del proceso por efecto de la formación de Fe(OH)₃ y, por lo tanto, la reducción de la cantidad de catalizador. Con base en lo anterior, la mayor remoción de DQO y COT se alcanza para pH inicial de 9, 10 mg/L de dosis de catalizador y 10 g/h de dosis de O₃ (ensayo del día 2). Los resultados de concentración de DQO y COT obtenidos para este ensayo en función del tiempo se presentan en tabla 4.

Tabla 4. Variación de la concentración de DQO y COT en el tiempo para el ensayo realizado el día 2

Tiempo (horas)	DQO (mg/L)	COT (mg/L)
0	423,00	130,85
1	398,00	106,85
2	364,00	97,30
3	342,00	88,40
4,5	293,00	82,64

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a remoción de DQO, los datos experimentales generalmente se ajustan a la cinética de primer orden (Huang *et al.*, 2019; Preethi *et al.*, 2009), puesto que la dosis de ozono es constante y se asume que la concentración de este en el agua también lo es; es decir, la velocidad de reducción de DQO depende de la concentración de este parámetro en el agua y del tiempo de reacción. Al respecto, el ajuste estadístico de los datos señala que el coeficiente cinético toma un valor de , con un coeficiente de correlación R² igual a 0,9905. En el caso de COT, el modelo cinético de segundo orden alcanzó la mayor correlación (R² 0,9525) y un coeficiente cinético de . A partir de lo anterior, se puede inferir que la mineralización de la materia orgánica por ozonización catalizada por Fe²⁺ depende de —por lo menos— dos variables: el pH y la concentración de COT en el agua cuando la dosis de ozono y catalizador son constantes. De acuerdo con esto, las ecuaciones para determinar la concentración de DQO y COT en función del tiempo para el proceso de ozonización catalítica analizado son:

$$DQO = DQO_o * e^{-(0,08119 h^{-1} * t)} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\frac{1}{COT} = \frac{1}{COT_o} - 0,0009714 \frac{L}{mg * h} * t \quad (\text{Ec. 2})$$

En las ecuaciones anteriores, DQO y COT son las concentraciones (mg/L) de cada uno de estos parámetros en cualquier instante de la reacción, DQO_o y COT_o la concentración (mg/L) al inicio de la reacción y *t* el tiempo de reacción (expresado en horas). Estas dos ecuaciones son válidas para las condiciones de pH, dosis de ozono y catalizador empleadas, suponiendo que la concentración de ozono en el agua es constante debido a que la tasa de aplicación es igualmente constante.

Finalmente, al realizar un contraste de los valores de remoción alcanzados a lo largo de la fase experimental frente a los datos preliminares de operación del sistema de tratamiento, se observa que el sistema pasó de tener remociones de DQO inferiores a 10 % a lograr una remoción de 30,73 % y valores similares de remoción de COT, lo que señala la completa mineralización de la materia orgánica presente en el agua. En otras palabras, los resultados obtenidos muestran

que la ozonización catalizada por Fe²⁺ permite lograr mayor mineralización de la materia orgánica en comparación con la ozonización directa.

Por otro lado, y con relación al modo de aplicación del ozono, el sistema de inyección a través de la garganta del Venturi representa una alternativa efectiva en términos de consumo de energía y transferencia de masa O₃/agua, puesto que en lugar de hacer uso del generador de ozono y de un compresor para la dosificación del ozono al agua, el sistema propuesto emplea el generador de ozono y una bomba que permite realizar simultáneamente la mezcla y dilución del agente oxidante en el agua, así como llevar a cabo la agitación del contenido del tanque de oxidación.

CONCLUSIONES

Para las condiciones de operación analizadas se determinó que es posible lograr hasta 30,76 % de remoción de DQO y 36,85 % de remoción de COT en un período de 4,5 horas de oxidación para un pH inicial de agua residual igual a 9, una dosis de catalizador de 10 mg/L de Fe²⁺ y 10 g/h de O₃. No obstante, resulta conveniente explorar el efecto de aumentar la dosis de O₃ para reducir el tiempo de reacción y así evitar la acumulación de agua residual en el tanque de homogeneización o la instalación de tanques adicionales para completar la reducción de la concentración de DQO y COT.

A lo largo de los ensayos realizados no se observó formación de lodos, aunque sí se evidenció un ligero cambio en el color del agua causado por la dosis de catalizador. Esto sugiere que además de incrementar la dosis de ozono resulta conveniente reducir la dosis de catalizador para eliminar este inconveniente o, como alternativa, pasar el agua por un sistema de decantación y posteriormente de filtración para eliminar el Fe(OH)₃. Con un pH superior a 9,5 el catalizador pierde efectividad, posiblemente por causa de la rápida formación de Fe(OH)₃, situación que reduce la velocidad de producción de radicales OH* por la descomposición del O₃.

REFERENCIAS

- Başaran-Dindaş, G., Çalişkan, Y., Çelebi, E. E., Tekbaş, M., Bektaş, N., & Yatmaz, H. C. (2020). Treatment of pharmaceutical wastewater by combination of electrocoagulation, electro-fenton and photocatalytic oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103777. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103777>
- Braga, W. L. M., de-Melo, D. H. A., de-Morais, D., Samanamud, G. R. L., França, A. B., Finzi-Quintão, C. M., Loures, C. C. A., de-Urzedo, A. P. F. M., Naves, L. L. R., de-Freitas-Gomes, J. H., & Naves, F. L. (2020). Optimization of the treatment of sanitary landfill by the ozonization catalysed by modified nanovermiculite in a rotating packed bed. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119395>
- Cao, Q., Sang, L., Tu, J., Xiao, Y., Liu, N., Wu, L., & Zhang, J. (2020). Rapid degradation of refractory organic pollutants by continuous ozonation in a micro-packed bed reactor. *Chemosphere*, 270, 128621. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128621>
- Chandak, S., Ghosh, P. K., & Gogate, P. R. (2020). Treatment of real pharmaceutical wastewater using different processes based on ultrasound in combination with oxidants. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.025>
- Huang, Y., Luo, M., Xu, Z., Zhang, D., & Li, L. (2019). Catalytic ozonation of organic contaminants in petrochemical wastewater with iron-nickel foam as catalyst. *Separation and Purification Technology*, 211(March), 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.080>
- Lalwani, J., Gupta, A., Thatikonda, S., & Subrahmanyam, C. (2020). Oxidative treatment of crude pharmaceutical industry effluent by hydrodynamic cavitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104281>

- Ling, L., Liu, Y., Pan, D., Lyu, W., Xu, X., Xiang, X., Lyu, M., & Zhu, L. (2020). Catalytic detoxification of pharmaceutical wastewater by Fenton-like reaction with activated alumina supported CoMnAl composite metal oxides catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 381(866), 122607. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122607>
- Mainardis, M., Buttazzoni, M., De-Bortoli, N., Mion, M., & Goi, D. (2020). Evaluation of ozonation applicability to pulp and paper streams for a sustainable wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120781. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120781>
- Olvera-Vargas, H., Gore-Datar, N., Garcia-Rodriguez, O., Mutnuri, S., & Lefebvre, O. (2021). Electro-Fenton treatment of real pharmaceutical wastewater paired with a BDD anode: Reaction mechanisms and respective contribution of homogeneous and heterogenous [rad]OH. *Chemical Engineering Journal*, 404(January), 126524. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126524>
- Preethi, V., Parama-Kalyani, K. S., Iyappan, K., Srinivasakannan, C., Balasubramaniam, N., & Vedaraman, N. (2009). Ozonation of tannery effluent for removal of COD and color. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 150-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.035>
- Rekhate, C. V., & Srivastava, J. K. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater. A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3(June), 100031. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100031>
- Ribeiro, A. R., Nunes, O. C., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2015). An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. *Environment International*, 75(February), 33-51. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.027>
- Wang, C., Li, A., & Shuang, C. (2018). The effect on ozone catalytic performance of prepared-FeOOH by different precursors. *Journal of Environmental Management*, 228(163), 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.103>
- Wang, J., & Chen, H. (2020). Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of the Total Environment*, 704, 135249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
- Zaied, B. K., Rashid, M., Nasrullah, M., Zularisam, A. W., Pant, D., & Singh, L. (2020). A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. *Science of the Total Environment*, 726, 138095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138095>

Producción de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* bajo factores de estrés salino utilizando un biorreactor de 5 L

Astaxanthin Production in *Haematococcus pluvialis* under Salt Stress Factors Using a 5L Laboratory Bioreactor

Ana Graciela Lancheros Díaz^{ac}, Luis Eduardo Díaz Barrera^b, Judith Elena Camacho Kurmen^{ad}

^a Grupo de Investigación Bioprocesos y Control, Programa Bacteriología y Laboratorio, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Colombia.

^b Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-9588-9935>

^c <https://orcid.org/0000-0002-5799-0282> | aglancheros@unicolmayor.edu.co

^d <https://orcid.org/0000-0002-8880-1501>

RESUMEN

Haematococcus pluvialis es una microalga que produce astaxantina, un betacaroteno y antioxidante ampliamente usado en la industria. Con el fin de obtener una mayor producción de astaxantina, se planteó como objetivo utilizar diferentes factores de estrés en un biorreactor de 5 litros a escala de laboratorio. Se cultivó la microalga en el medio RM con un pH de 6,8, temperatura 20 ± 2 °C, aire filtrado, iluminación con lámparas blancas 20 h luz/4 h oscuridad, irradiancia 75 luxes y el uso de diferentes concentraciones de acetato de sodio y cloruro de sodio. Se determinó crecimiento celular, cambios morfológicos y cuantificación de astaxantina y clorofila por espectrofotometría. Además, se realizó un análisis estadístico a través de ANOVA (95 %). Utilizando 0,299 mg/L de acetato

de sodio se obtuvo un crecimiento celular de $2,0 \times 10^4$ cel/mL y una concentración de astaxantina de 2,530 µg/mL, mientras que con 1,6 mg/L de acetato de sodio el crecimiento celular fue de $3,5 \times 10^4$ cel/mL y la concentración de astaxantina de 1,9 µg/ml. El tratamiento que recibió 1,6 g/L de acetato de sodio y 6,4 g/L de cloruro de sodio presentó la mayor producción de astaxantina (7,3 µg/ml). Por su parte, el tratamiento con acetato de sodio 0,320 g/L + cloruro de sodio 1,28 g/L presentó el mayor crecimiento celular ($1,64 \times 10^5$ células/ml). Esta investigación destaca la importancia de cultivar inicialmente la microalga utilizando el biorreactor Tecferm de 5 litros, para luego, una vez

Citation: Lancheros-Díaz, A. G., Díaz-Barrera, L. E. y Camacho-Kurmen, J. E. (2021). Producción de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* bajo factores de estrés salino utilizando un biorreactor de 5 L. *Mutis*, 11(2), 64-83. <https://doi.org/10.21789/22561498.1780>

Recibido: 9 de febrero de 2021. **Aceptado:** 1 de junio de 2021.

Copyright: ©2021. Lancheros-Díaz, A. G., Díaz-Barrera, L. E. y Camacho-Kurmen, J. E. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.



finalizada su fase exponencial, someterla a factores de estrés con acetato de sodio y cloruro de sodio, con lo cual se logra una mayor producción de astaxantina (7,325 µg/ml).

Palabras clave: microalga, crecimiento celular, biorreactor, acetato de sodio, astaxantina.

ABSTRACT

Haematococcus pluvialis is a type of microalgae that produces astaxanthin, a beta-carotene and antioxidant widely used for industrial purposes. Therefore, the objective of this research was to test different stress factors in a 5-liter laboratory-scale bioreactor in order to obtain a higher production of astaxanthin. The microalgae were cultivated in the RM medium, a pH of 6.8, temperature 20 ± 2 °C, filtered air, illumination with white lamps at a ratio of 20h light/4h darkness, irradiance 75 luxes, and different concentrations of sodium acetate and chloride of sodium. Cell growth, morphological changes, and the quantification of astaxanthin and chlorophyll were determined by spectrophotometry. Statistical analysis was performed through ANOVA (95%). A cell growth of 2.0×10^4 Cel/mL and an astaxanthin concentration of 2.530 µg/mL were obtained using 0.299 mg/L of sodium acetate. Using 1.6 mg/L of sodium acetate cell growth was 3.5×10^4 Cel/mL and astaxanthin concentration reached a value of 1.9 µg/mL. The treatment in which 1.6 g/L of sodium acetate and 6.4 g/L of sodium chloride were added showed the highest astaxanthin production (7.3 µg/ml). In addition, the treatment with 0.320 g/L sodium acetate + 1.28 g/L sodium chloride showed the highest cell growth (1.64×10^5 cells/ml). This research highlights the importance of initially cultivating the microalgae using the 5-liter Tecferm bioreactor and —after its exponential phase— subjecting it to stress factors with sodium acetate and sodium chloride, which allows achieving a high production of astaxanthin, estimated at 7.325 µg/ml.

Keywords: Microalgae, cell growth, bioreactor, sodium acetate, astaxanthin.

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son fuente de un gran número de compuestos bioactivos de interés industrial, como los carotenoides, que se utilizan como colorantes naturales en alimentación animal y humana, así como en la industria farmacéutica, cosmética y en la acuicultura. Además, las microalgas han sido consideradas como agentes efectivos en la prevención de diversas enfermedades debido a su capacidad antioxidante, inmunorreguladora, antiinflamatoria y anticancerígena (Shah *et al.*, 2016).

El cultivo de microalgas también tiene la capacidad de metabolizar los nutrientes del medio en donde habitan, por lo cual estas son utilizadas para la biorremediación de aguas residuales producto de la actividad industrial, doméstica y la explotación agropecuaria, que no deben ser vertidas directamente a los cuerpos de agua debido a los problemas sanitarios que puedan generar. En este contexto, la implementación de métodos microbiológicos podría dar un nuevo enfoque a las tecnologías de reducción utilizadas actualmente (Vásquez-Perea *et al.*, 2014).

El alga unicelular *H. pluvialis* ha sido estudiada exhaustivamente debido a su capacidad para acumular astaxantina y otros carotenoides relacionados. La acumulación de este carotenoide en la microalga se encuentra relacionada con la evolución de diferentes etapas de la célula vegetativa a la aplanospora en el ciclo de la microalga, aunque esta transición solo se da cuando esta ha sido sometida a diferentes condiciones de estrés (Shah *et al.*, 2016). Actualmente, se conocen diferentes condiciones de estrés como la deficiencia de nutrientes tales como el nitrógeno (Gómez *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2018; Tocquin *et al.*, 2012), la intensidad de la luz (Lv *et al.*, 2016), colores de luz (Xi *et al.*, 2016), alta salinidad (Lababpour & Lee, 2006), pH y la presencia de nutrientes orgánicos como acetato de sodio o la combinación cloruro de sodio/acetato de sodio, aumentando el contenido total de carotenoides y el contenido total de astaxantina (Pan-utai *et al.*, 2017; Vidhyavathi *et al.*, 2009). El acetato de sodio ha demostrado ser una fuente importante de carbono para la microalga, mejorando su crecimiento y carotenogénesis, debido a que afecta la ruta de la fotosíntesis (He *et al.*, 2018) y aumenta la expresión del gen BKT, produciendo así mayor cantidad de astaxantina,

como lo reportan Wan *et al.* (2014), quienes utilizaron para el cultivo de la microalga *H. pluvialis* y la producción de astaxantina un fotobiorreactor de 10 Litros con medio NIES-C, usando una concentración 10mM de acetato de sodio como fuente de carbono, luz continua con irradiancia de $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatura de 25 °C, CO₂ 4 % y pH 7,5, obteniendo una producción de astaxantina de 65,8 mg y una producción de biomasa de 3,7 mg durante 12 días de experimentación. Así mismo, Park *et al.* (2014) reportaron un aumento de la producción de astaxantina utilizando un cultivo mixotrófico combinando acetato de sodio y alta irradiancia, obteniendo una producción de astaxantina de 602 mg/L.

La realización de esta investigación pretende aprovechar los avances de la ciencia y la tecnología basados en la utilización de las propiedades de los organismos, en particular en los niveles celular y subcelular, para generar y adaptar tecnologías que permitan obtener compuestos bioactivos a través de bioprocesos. A partir de ello, una estrategia promisoría para mejorar la producción de astaxantina en *H. pluvialis* es el estudio de las rutas metabólicas y su regulación con el fin de optimizar las condiciones de crecimiento, desarrollo y producción, puesto que la utilización del *H. pluvialis* presenta ciertas dificultades durante la etapa de cultivo y la obtención del pigmento en cantidades de interés como resultado de su complejo ciclo celular. Al respecto, uno de los principales inconvenientes es que se trata de un producto del metabolismo secundario, por lo que durante el crecimiento activo de la microalga no se produce síntesis de astaxantina, lo cual ocurre solo cuando cesa la división celular, se inicia su síntesis y este carotenoide se acumula en grandes cantidades.

El *H. pluvialis* también reporta tasas de crecimiento bajas, lo que debilita sus posibilidades de uso como fuente natural del pigmento, además de ser altamente susceptible a la contaminación. Estas características requieren cultivos en sistemas cerrados, los cuales ofrecen ventajas como mejor control del cultivo, protección de la contaminación ambiental y producción de gran cantidad de biomasa, así como el desarrollo de un medio de cultivo óptimo para su crecimiento, considerando que el uso de una adecuada tecnología de cultivo incrementa la producción de biomasa hasta niveles óptimos para la producción del pigmento. De igual forma, un mayor entendimiento de las bases moleculares de la relación condiciones de estrés-inducción-acumulación

de astaxantina en *H. pluvialis* podría ser útil para aumentar la productividad de este compuesto.

Por lo anterior, la presente investigación busca determinar un método adecuado y óptimo para la producción de astaxantina, puesto que actualmente esta se sintetiza químicamente y reporta un alto costo de producción, cercano a USD 2.500 por kilogramo (Richmond & Hu, 2013; Shah *et al.*, 2016; Sugawara & Maoka, 2021), además de haber sido prohibida en el mercado por la Administración de Medicamentos y Alimentos de Estados Unidos (FDA, en inglés) como consecuencia de su baja biodisponibilidad y seguridad. Estas preocupaciones se deben principalmente a la estereoquímica diferente y el potencial arrastre de los intermedios de síntesis, lo cual hace que la astaxantina natural de *H. pluvialis* sea una opción viable y de buena calidad frente a la utilización de su forma química y de otros microorganismos capaces de producirla.

Teniendo en cuenta la capacidad de *H. pluvialis* para producir y acumular gran cantidad de astaxantina, así como la necesidad de determinar las condiciones óptimas para aumentar su producción, el objetivo del presente trabajo es determinar el efecto del estrés salino utilizando acetato de sodio y cloruro de sodio, combinado con alta irradiancia, con el fin de seleccionar condiciones de proceso. Para ello, se emplearon biorreactores de 500 mL y se realizó el escalamiento del cultivo en un biorreactor Tecferm de 5 litros, usando los factores de estrés acetato de sodio y alta irradiancia. Adicionalmente, se llevó a cabo la cuantificación del crecimiento celular, la caracterización morfológica y la cuantificación de astaxantina y de clorofila.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microorganismo y cultivo

La microalga *H. pluvialis* fue obtenida de la colección de cultivos de algas de la Universidad de Texas (UTEX 2505), siendo suministrada por la facultad de Ingeniería de la Universidad de La Sabana. La cepa se mantuvo en medio sólido y líquido Mes-Volvox (sugerido por la UTEX) a baja irradiancia y una temperatura entre 15 y 20 °C (UTEX, 2019).

El cultivo se realizó en medio de cultivo Mes-Volvox, el cual consistía de Ca(NO₃)₂·4H₂O 11,8 g 100 mL⁻¹,

MgSO₄.7H₂O 4 g 100 mL⁻¹, Na₂glicerofosfato.5H₂O 0,05 g L⁻¹, KCl 0,05g/L, MES 1,95 g L⁻¹, solución de metales PIV 6 ml L⁻¹, NH₄Cl 0,026 g L⁻¹, vitamina B12 1ml L⁻¹, HEPES y biotina 1 ml L⁻¹, ajustado a pH de 6,7, luz blanca provista por lámparas fluorescentes (Tlt 20w/54RS marca Philips) con una irradiancia de 75 lux, fotoperíodo de 18 horas de luz y 6 horas de oscuridad, temperatura de 25 °C, aire filtrado y agitación manual de 10 segundos al día.

El cultivo se monitoreo por medio de microscopía en cámara de Neubauer, donde cada tercer día se realizaba conteo y se evaluaban parámetros como color (pigmento), morfología y viabilidad celular.

Efecto de estrés salino sobre la producción de astaxantina

Preparación del cultivo

El cultivo de *H. pluvialis* se realizó en sistema *batch* por triplicado para cada tratamiento a ensayar utilizando el medio de cultivo RM, el cual consistió de NaNO₃ 300 mg L⁻¹, K₂HPO₄ 80 mg L⁻¹, KH₂PO₄ 60 mg L⁻¹, MgSO₄.7H₂O 10 mg L⁻¹, CaCl₂.2H₂O 58,5 mg L⁻¹, EDTA 7,5, mg L⁻¹, NaCl 20 mg L⁻¹, H₃BO₃ 0,3 mg L⁻¹, MnSO₄.H₂O 1,5 mg L⁻¹, ZnSO₄.7H₂O 0,1 mg L⁻¹, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O 0,3 mg L⁻¹, CuSO₄.5H₂O 0,08 mg L⁻¹, Co(NO₃)₂.6H₂O 0,26 mg L⁻¹, FeCl₃.6H₂O 17 mg L⁻¹, ajustado a un pH de 6,7 (Imamoglu *et al.*, 2007).

Los tratamientos a ensayar fueron medio RM utilizado como control del estudio (tratamiento 1), con adiciones de 0,18 g/L de acetato de sodio desde el inicio y 0,72 g/L de cloruro de sodio (tratamiento 2); 1,6 g/L de acetato de sodio desde el inicio y 6,4 g/L de cloruro de sodio (tratamiento 3) (la adición de cloruro de sodio en los tratamientos 2 y 3 se realizó en el día 15 del cultivo); 0,18 g/L de acetato de sodio y 0,72 g/L de cloruro de sodio (tratamiento 4); 1,6 g/L de acetato de sodio + 6,4 g/L de cloruro de sodio (tratamiento 5); y 0,320 g/L acetato de sodio + 1,28 g/L de cloruro de sodio (tratamiento 6). La adición de las sales en los tratamientos 4, 5 y 6, se realizó en el día 15 del cultivo. El medio estéril con el pH ajustado se adicionó en biorreactores de 500 ml hasta un volumen de 350 ml. Los biorreactores se sellaron para garantizar esterilidad (Rodríguez, 2019).

Se procedió a adicionar el inóculo de la microalga con una concentración de 1 x 10⁴ células mL⁻¹ a cada biorreactor. Se realizó el cultivo bajo las siguientes

condiciones: pH 6,7, ciclo luz/oscuridad 20:4 h, temperatura 20 °C, agitación continua, aire filtrado, iluminación con lámparas fluorescentes blancas (Tlt 20w/54RS marca Philips) y una irradiancia de 75 lux.

Se realizó también el cultivo de *H. pluvialis* en el biorreactor Tecferm a escala de laboratorio de 5 litros (figura 1) en sistema *batch* en el medio RM, utilizando 2 L del medio de cultivo RM, pH 6,7, ciclo luz/oscuridad 20:4 h, temperatura 20 °C, agitación 100 rpm, aire filtrado, iluminación con lámparas fluorescentes blancas (Tlt 20w/54RS marca Philips) y una irradiancia de 75 lux. Los tratamientos realizados utilizaron una concentración de 0,299 mg/L de acetato de sodio en el medio RM, tomando como referencia un tratamiento previo donde se utilizaron 0,310 mg /L de acetato de sodio combinado con una irradiancia a 140 µE/m²s en medio RM, obteniendo 8,3 µg/ml de astaxantina (Giannelli *et al.*, 2015; Niño-Castillo & Rodríguez-Rivera, 2015) y 1, 6 mg/L de acetato de sodio en el medio RM bajo las condiciones de trabajo previamente establecidas (García, 2018).

La toma de muestras se realizó cada tres días en forma aséptica. La conservación de las muestras se realizó en solución salina (1:9) en una proporción 1:1, tomando 1,0 mL para realizar control del cultivo (conteo celular, viabilidad, morfología y registro fotográfico). El resto de la muestra se utilizó para medición de pH. Adicionalmente, se tomaron 10 mL para cuantificación de pigmentos. El tiempo de estudio fue de 36 días.

Figura 1. Biorreactor Tecferm



Fuente: tomado de García (2018).

Determinación de concentración de clorofila y astaxantina

Las muestras fueron centrifugadas a 12.000 rpm durante 5 minutos. Posteriormente, se retiró el sobrenadante (medio de cultivo). Al paquete celular se le adicionó 1 mL de metanol al 90 % para luego ser calentado durante 10 min a 60 °C en baño serológico, tras lo cual fue centrifugado nuevamente a 12.000 rpm durante 5 minutos (APHA, 1992).

Para la cuantificación de clorofila y astaxantina se realizó la curva de calibración con patrones de referencia, llevando a cabo la lectura espectrofotométrica en el equipo Thermo Scientific Evolution 201, a una longitud de onda de 667 nm para clorofila y 477 nm para astaxantina. Las concentraciones se expresan en $\mu\text{g}/\text{mL}$.

Crecimiento de *H. pluvialis*

Se realizó conteo celular en cámara de Neubauer por triplicado. Se realizó curva de crecimiento a partir de los resultados. Las tendencias de crecimiento fueron ajustadas al modelo logístico mediante transformación de los valores de Y, cuyo logaritmo fue calculado en base 10 para la obtención de log vs tiempo.

Análisis estadístico

Los experimentos se realizaron por triplicado para cada tratamiento ensayado. Se realizó un análisis de varianza ANOVA (95 %) para determinar diferencias significativas entre tratamientos, donde los valores de $P < 0,05$ fueron considerados estadísticamente significativos. Para el análisis estadístico se utilizó el programa Excel 2016.

RESULTADOS

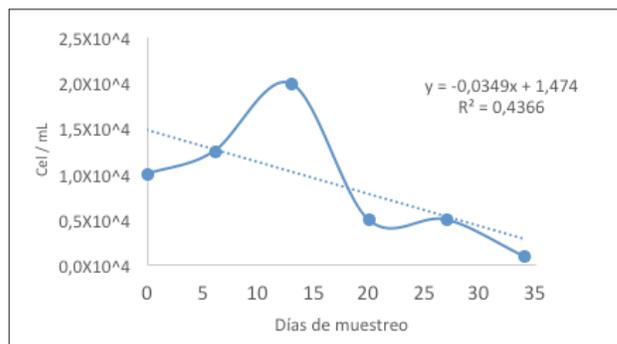
El tratamiento con 0,299 mg/L en el medio RM y el uso del biorreactor Tecferm de 5 litros permitió obtener un recuento de inicial de $1,0 \times 10^4$ cel/mL y un recuento final del 1×10^3 cel/mL durante los 34 días del estudio. El pH presentó fluctuaciones entre 6,7 y 7,5, siendo cercano a un nivel neutro.

El recuento celular obtenido con el tratamiento de 0,299 mg/L de acetato de sodio indica que la microalga presenta crecimiento exponencial hasta el día 13, con un recuento celular de $2,0 \times 10^4$ cel/mL hasta el

día 20, cuando este empieza a disminuir hasta el día 34, en el que se reporta un recuento de 1×10^3 cel/mL (figuras 2 y 4).

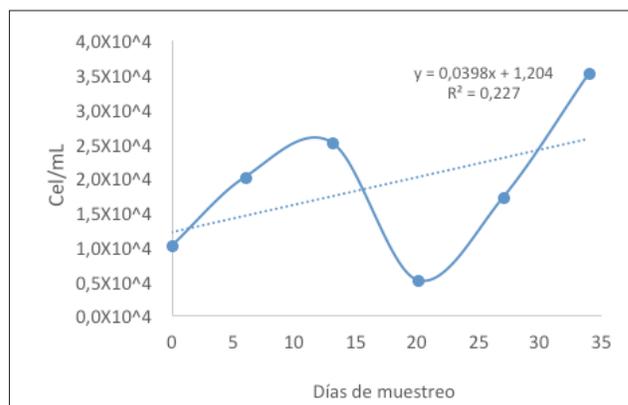
Con respecto al recuento celular obtenido con el tratamiento de 1,6 mg/L de acetato de sodio, se observó de nuevo que la microalga presenta un crecimiento exponencial hasta el día 13, alcanzando un recuento de $2,5 \times 10^4$ cel/mL, para luego iniciar una disminución que se prolonga hasta el día 20. Finalmente, el día 27 reporta un recuento de $1,7 \times 10^4$ cel/mL. En el día 34 se obtiene un aumento del recuento celular de $3,5 \times 10^4$ cel/mL, valor superior al registrado el día 13, momento en el que finaliza la fase exponencial de la microalga (figuras 3 y 4). El medio de cultivo con mayor velocidad específica de crecimiento fue el RM con concentración de acetato de sodio 0,299 mg/L, con una velocidad de crecimiento de 0,029 células/día (tabla 1).

Figura 2. Curva crecimiento celular con 0,299 mg/L de acetato de sodio



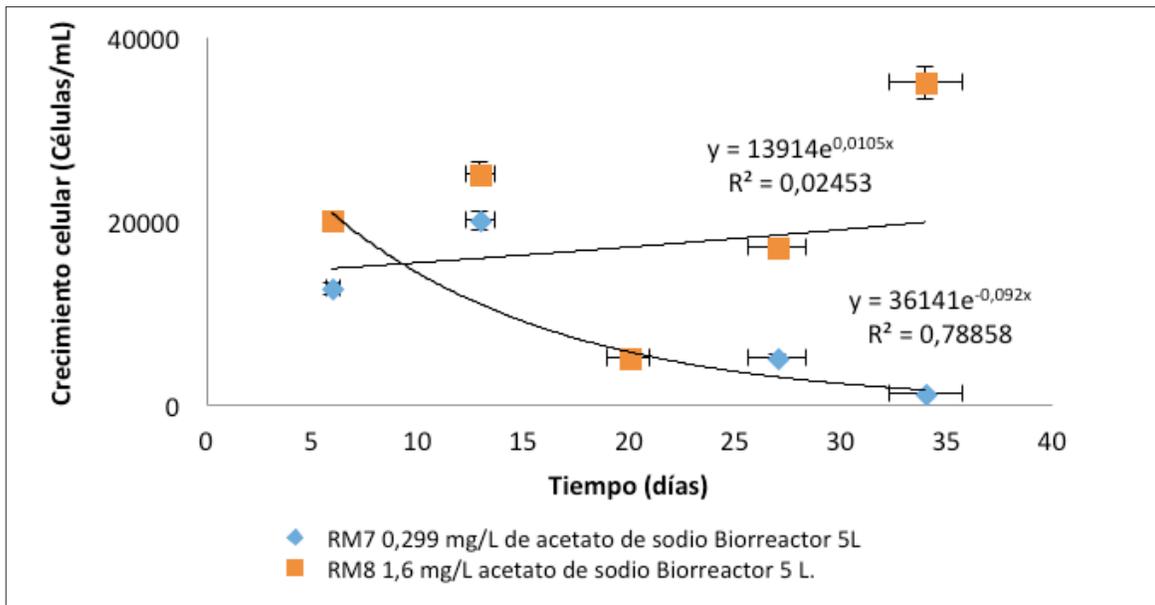
Fuente: García (2018).

Figura 3. Curva crecimiento celular con 1,6 mg/L de acetato de sodio



Fuente: García (2018).

Figura 4. Curva crecimiento celular con acetato de sodio



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Matriz de coeficientes del modelo logístico ajustado para los diferentes tratamientos

Medio de cultivo	Número de datos	Dato mínimo	Dato máximo	Velocidad de crecimiento	Coefficiente de determinación
RM y acetato 0,299 mg/L	6	4,204	4,300	0,029 cel/día	79
RM y acetato 1,6 mg/L	6	4,301	4,540	0,014 cel/día	49

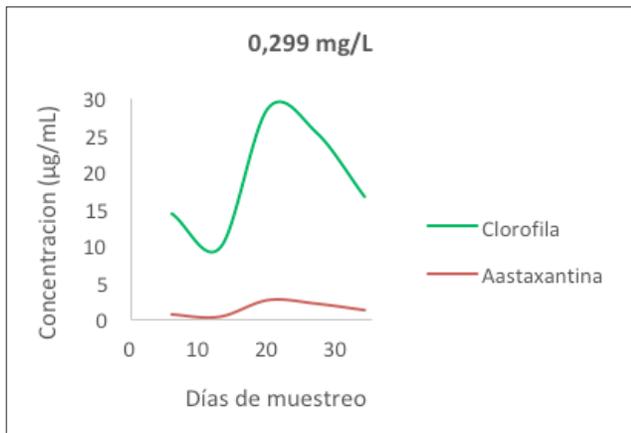
Fuente: García (2018).

El ANOVA (95 %) estableció que no existen diferencias significativas entre los tratamientos ensayados ($P = 0,795$; $gl = 1$; $F = 0,071$). Sin embargo, el tratamiento que brinda mejores resultados es aquel en el que se utilizaron 0,299 mg/L de acetato de sodio, puesto que con esta concentración se obtuvo un mayor crecimiento y mejor velocidad, mejorando así el crecimiento de la microalga y posiblemente generando una mayor acumulación de astaxantina. Esta

concentración también presentó un mejor ajuste al modelo logístico de crecimiento.

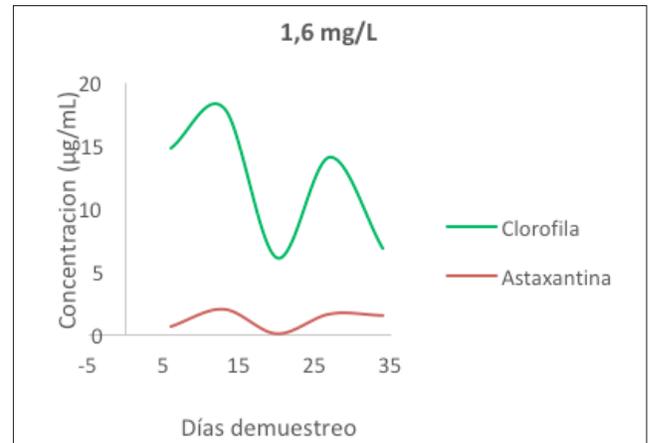
En cuanto a las concentraciones de astaxantina y clorofila (expresadas en $\mu\text{g/mL}$), el tratamiento con 0,299 mg/L de acetato de sodio (figura 5 y 7a) presenta concentraciones de 28,706 $\mu\text{g/mL}$ de clorofila y 2,530 $\mu\text{g/mL}$ de astaxantina, comportamiento que se correlaciona con el recuento celular obtenido.

Figura 5. Concentraciones de clorofila y astaxantina durante el montaje de 0,299 mg/L



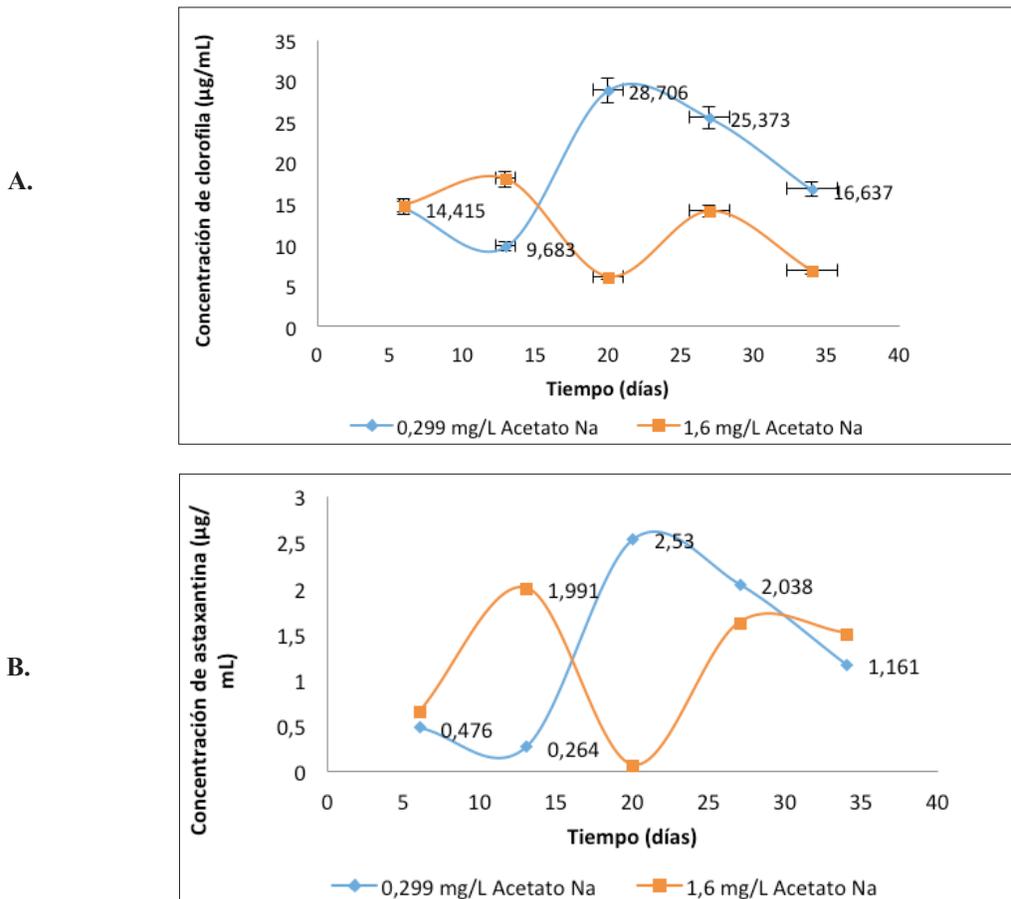
Fuente: García (2018).

Figura 6. Concentraciones de clorofila y astaxantina durante el montaje de 1,6 mg/L



Fuente: García (2018).

Figura 7. Concentraciones de clorofila (A) y astaxantina (B)



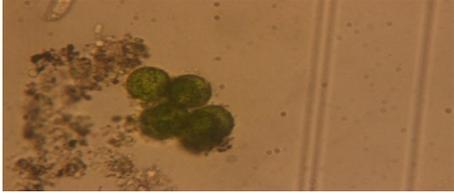
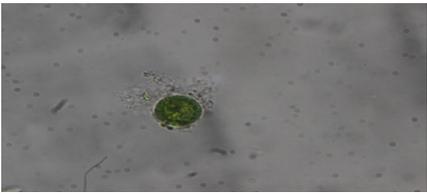
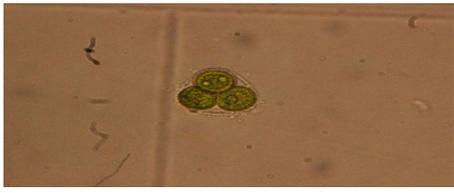
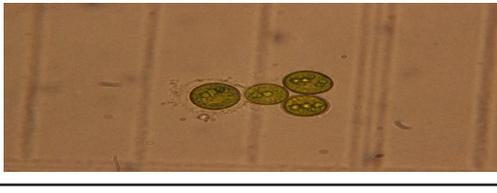
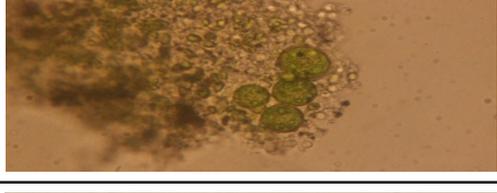
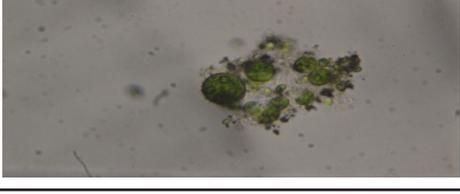
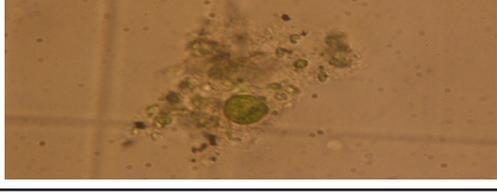
Fuente: elaboración propia.

De otro lado, en el tratamiento con 1,6 mg/L de acetato de sodio (figuras 5 y 7A-B) se encontró mayor concentración de clorofila que de astaxantina, ambas presentando su pico máximo en el día 13, las cuales reportaron concentraciones de 17,902 µg/mL y 1,991 µg/mL, respectivamente, comportamiento que se correlaciona con el recuento celular. El ANOVA (95 %) estableció que no existen diferencias significativas entre los tratamientos ensayados para la concentración de clorofila ($P = 1$; $gl = 1$; $F = 0$) y astaxantina

($P = 0,820$; $gl = 1$; $F = 0,054$). Sin embargo, se observa que con la concentración de 0,299 mg/L de acetato de sodio se obtiene un incremento de 21 % en la cantidad de astaxantina, en comparación con el tratamiento con 1,6 mg/L.

Durante cada montaje se llevó un registro fotográfico microscópico con el fin de evaluar la morfología de la microalga desde sus formas vegetativas hasta sus formas enquistadas (tabla 2).

Tabla 2. Registro fotográfico microscópico

Día	0,299 mg/L	1,6 mg/L
	Imagen	Imagen
6		
13		
20		
27		
34		

Fuente: tomado de García (2018).

A partir del registro fotográfico de ambos tratamientos (0,299 mg/L y 1,6 mg/L de acetato de sodio), se evidencia que estos presentaron formas celulares vegetativas, biflagelas y palmeloides sin acumulación de astaxantina. Lo anterior gracias a que —aunque sí se hallaron concentraciones de astaxantina— al momento de realizar el registro fotográfico no se pudieron observar formas quísticas con acumulación de astaxantina.

Entre los días 13 y 20 se observó una mayor cantidad de formas celulares vegetativas verdes sin flagelos debido a que el crecimiento exponencial de *H. pluvialis* ha terminado, e inicia su fase de descenso. En contraste, en los días finales de los tratamientos se observaron formas celulares quísticas debido a que los nutrientes se iban agotando, siendo las primeras un tipo de formas más resistentes (tabla 3) (Jeon *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2016).

Tabla 3. Tratamientos de 0,299 mg/L y 1,6 mg/L de acetato sodio

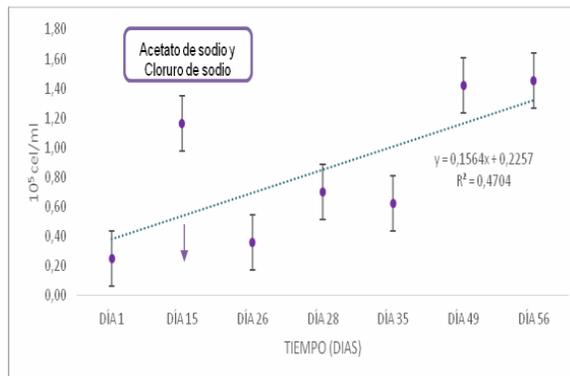
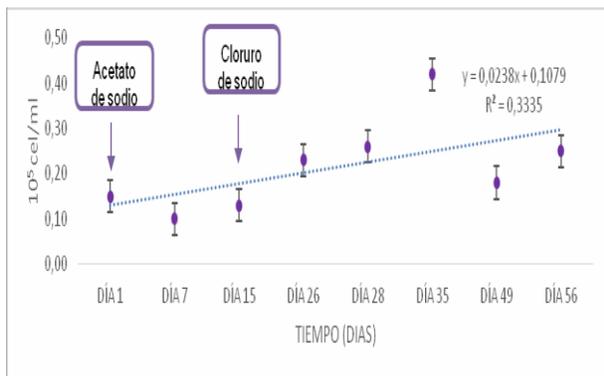
Concentración de acetato de sodio	Recuento celular (cel/mL)	pH	Concentración de astaxantina (µg/mL)	Concentración de clorofila (µg/mL)	Velocidad de crecimiento (cel/día)
0,299 mg/L	2,0 x 10 ⁴	7,5	2,530	28,706	0,029
	Día 20	Día 34	Día 20	Día 20	
1,6 mg/L	3,5 x 10 ⁴	8,6	1,991	17,902	0,014
	Día 34	Día 34	Día 13	Día 13	

Fuente: García (2018).

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los tratamientos donde se utilizaron biorreactores de 500 mL, encontrándose que con 0,320 g/L de acetato de sodio y 1,28 g/L de cloruro de sodio, adicionados desde el día 15 del estudio al medio RM (RM6), iluminación con lámparas blancas con 20 h luz/4 h oscuridad y 75 lux de irradiancia, se registró

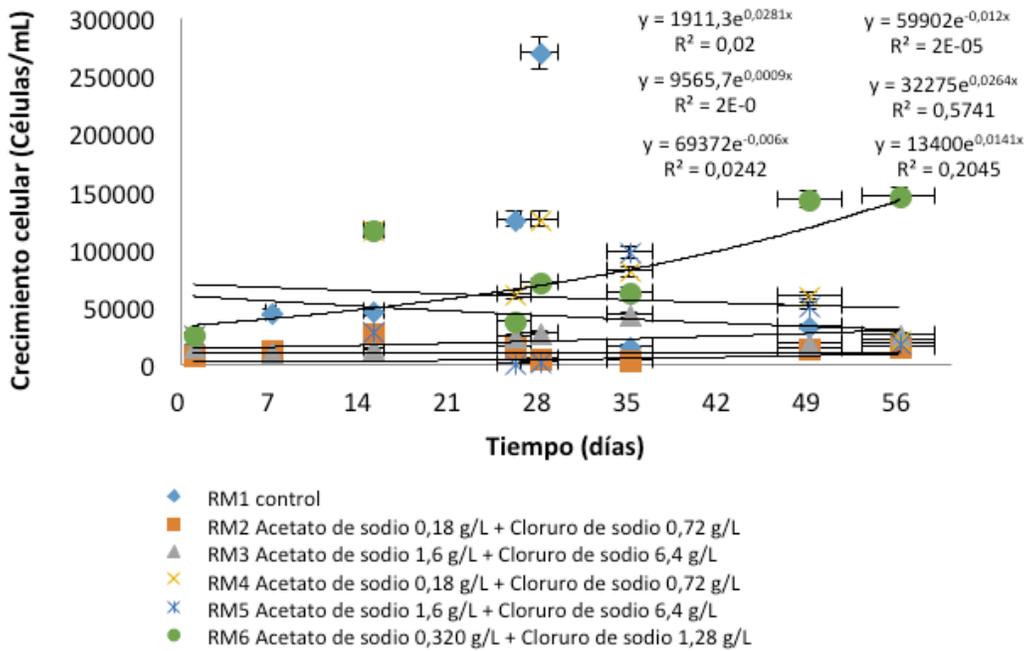
una velocidad de crecimiento de 1,018 cel/día. Este fue seguido por el tratamiento RM3, el cual contenía 1,6 g/L de acetato de sodio (añadido desde el inicio), 6,4 g/L de cloruro de sodio (agregado el día 15 del estudio) bajo las mismas condiciones de irradiancia y fotoperíodo, reportando una velocidad de crecimiento de 0,696 cel/día (figuras 8 y 9).

Figura 8. Curva de crecimiento T. RM3 Acetato de sodio 1,6 g/L + Cloruro de sodio 6,4 g/L (izquierda) y T. RM6 Acetato de sodio 0,320 g/L + Cloruro de sodio 1,28 g/L (derecha)



Fuente: Rodríguez (2019).

Figura 9. Tratamientos con acetato de sodio y cloruro de sodio

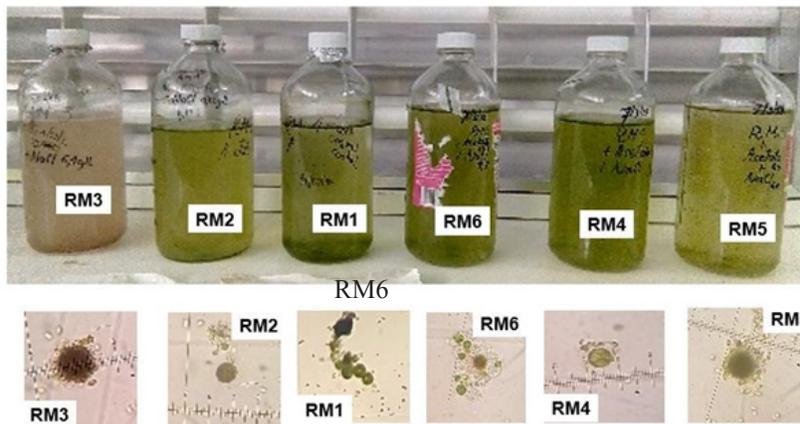


Fuente: elaboración propia.

El análisis de varianza ANOVA (95 %) estableció que existen diferencias significativas ($F = 22,47$; $p = 0,025$; $gl = 5$) entre los diferentes tratamientos con respecto al crecimiento celular. El tratamiento RM6 y RM4 fueron los que presentaron mayor crecimiento ($1,45 \times 10^5$ cel/ml y $1,25 \times 10^5$ cel/ml, respectivamente). Por su parte, el control (RM1) reportó un crecimiento de $2,69 \times 10^5$ cel/ml (figuras 8 y 9).

En el estudio se observaron las dos fases que experimenta la microalga *H. pluvialis* como consecuencia de la combinación de factores de estrés: fase vegetativa y fase roja. Se observan además formas de palmella y células enquistadas (RM3), así como aplanosporas (figura 10).

Figura 10. Tratamientos de *H. pluvialis* (día 35)



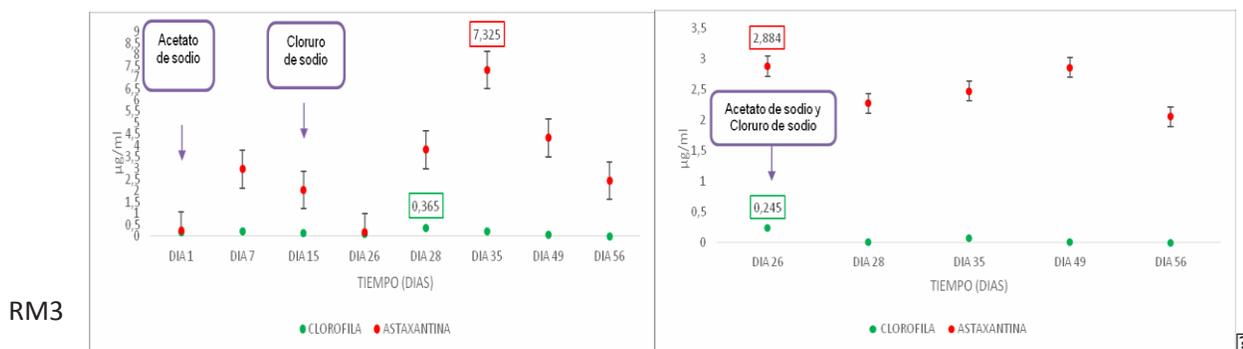
Fuente: Rodríguez (2019).

El tratamiento que presentó la mayor concentración de clorofila fue RM6 (0,245 microgramos/L), presentándose diferencias significativas entre tratamientos ($F = 4,307$; $p = 0,003$; $gl = 5$). La producción de clorofila se correlaciona con el crecimiento de la microalga puesto que al aumentar la biomasa incrementa también el contenido de clorofila.

El tratamiento RM3 presentó la mayor concentración de astaxantina (7,325 $\mu\text{g/ml}$), utilizando una

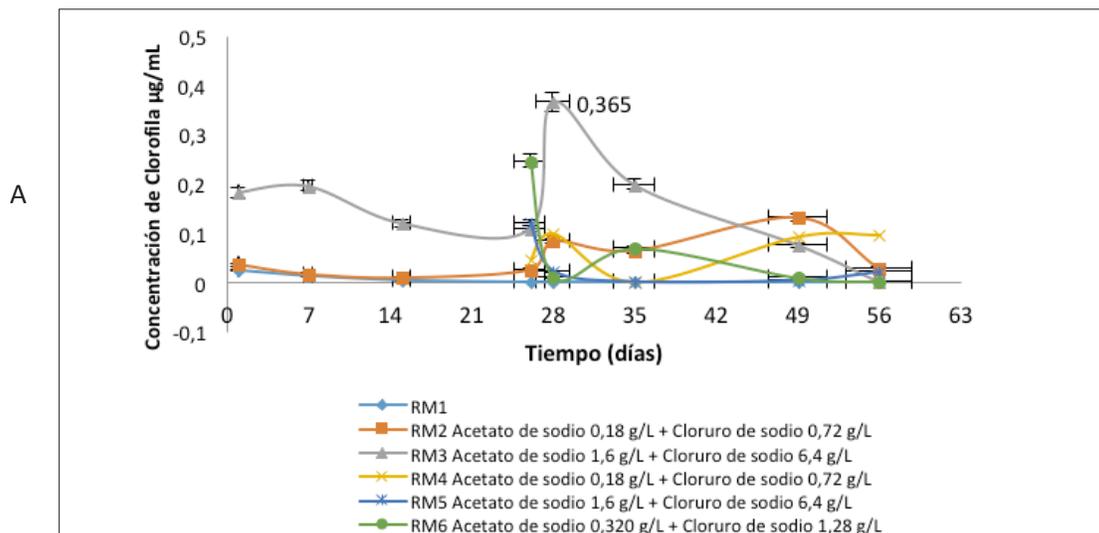
concentración de 1,6 g/L de acetato de sodio desde el inicio del estudio y 6,4 g/L de cloruro de sodio a partir del día 15 (figuras 11 y 12). Al analizar los tratamientos realizados, no se evidencian diferencias significativas entre estos con respecto a la producción de astaxantina ($F = 1,687$; $p = 0,165$; $gl = 5$). La tabla 4 presenta un resumen de los resultados obtenidos en cada tratamiento.

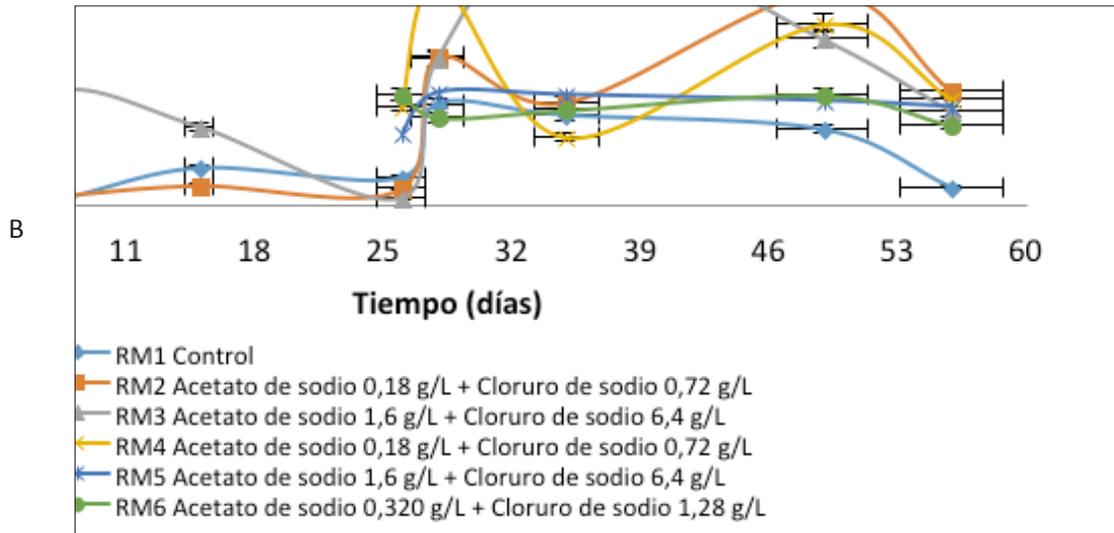
Figura 11. Concentración de clorofila (verde) y astaxantina (rojo) T. RM3 (acetato de sodio 1,6 g/L + cloruro de sodio 6,4 g/L) y T. RM6 (acetato de sodio 0,320 g/L + Cloruro de sodio 1,28 g/L)



Fuente: Rodríguez (2019).

Figura 12. Concentración de clorofila (A) y astaxantina (B)





Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de los tratamientos realizados

	Crecimiento celular máximo (x10 ⁵ cel/ml)	Día de máximo crecimiento celular	P < 0,05	Concentración máxima de astaxantina (µg/ml)	Día de máxima concentración de astaxantina	P < 0,05	Concentración máxima de clorofila (µg/ml)	P < 0,05
RM1 Control	2,69	28	0,025	2,623	28	0,165	0,024	0,003
RM2	0,27	15		5,580	49		0,131	
RM3	0,42	35		7,325	35		0,365	
RM4	1,25	28		5,862	28		0,098	
RM5	1,16	15		2,936	28		0,118	
RM6	1,45	56		2,884	26		0,245	

ANOVA (95 %). Diferencias significativas entre tratamientos p < 0,05.

Fuente: Rodríguez (2019).

Al comparar los resultados de los tratamientos realizados se observa que la combinación de acetato de sodio y cloruro de sodio incrementó la producción de astaxantina en 65 %, en comparación con el tratamiento realizado en el biorreactor, donde se trabajó solo con acetato de sodio en una cantidad de 0,299 mg/L. Esto se debe a que inicialmente el acetato de sodio es tomado como fuente de carbono para incrementar el crecimiento celular y luego es influenciado por el factor de estrés de deficiencia de nutrientes y la salinidad suministrada por el cloruro de sodio, combinados con el aumento de la irradiancia.

DISCUSIÓN

El uso de biorreactores para el escalamiento con sistemas cerrados, como el utilizado en este estudio, proporciona mejores condiciones para el crecimiento de la mayoría de microalgas, puesto que estos protegen al cultivo de la contaminación y permiten controlar de manera integral las condiciones de cultivo (Giannelli *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2013, Ramírez-Landínez, 2013), como se determinó en el cultivo realizado en el biorreactor Tecferm de 5 litros, obteniendo una biomasa adecuada de *H. pluvialis*. Además de esto, tomando como base los resultados reportados por Giannelli *et al.* (2015) y el trabajo de Niño-Castillo *et al.* (2017), se optó por utilizar el medio RM bajo las condiciones de estrés de acetato de sodio (0,299 mg/L y 1,6 mg/L), pH 6,8, temperatura $20 \pm 1^\circ\text{C}$, fotoperíodo 20 h luz blanca y 4 h oscuridad, aire filtrado y agitación fluctuante entre 90 y 180 rpm con el fin de aumentar el crecimiento del inoculo inicial ($1,0 \times 10^4$ cel/mL), y con ello inducir la acumulación de astaxantina en su forma quística en la microalga, como se ha observado en los estudios de Cifuentes *et al.* (2003) y He *et al.* (2018), debido a que el acetato de sodio produce una afectación de la fotosíntesis de la microalga, incrementando la producción de este carotenoide.

Autores como Gómez *et al.* (2019), Pan-utai *et al.* (2017), Vidhyavathi *et al.* (2009) y Ma *et al.* (2018) han incorporado diferentes condiciones de estrés que ayudan a la adecuada acumulación de astaxantina —como tipo, color y nivel de intensidad de luz,

agitación, deficiencia de nutrientes, pH, uso de acetato de sodio y cloruro de sodio—, reportando buenos resultados y estableciendo la importancia de combinar condiciones de estrés como la aplicación de acetato de sodio y una alta irradiancia, con lo cual se ha registrado una acumulación de astaxantina de 32,99 $\mu\text{g/mL}$ (Tocquin *et al.*, 2012). A partir de ello, el presente estudio utiliza el acetato de sodio como factor de estrés en diferentes concentraciones, combinado con alta intensidad de luz blanca y un fotoperíodo de 20 horas luz y 4 horas oscuridad, con lo que se observó que la concentración de 0,299 mg/L es la más adecuada para su uso en el biorreactor, permitiendo obtener un incremento de 21 % en la producción de astaxantina, en comparación con la concentración de 1,6 mg/L de acetato de sodio. Esto se podría explicar teniendo en cuenta que la concentración de acetato de sodio debe ser controlada, ya que niveles inapropiados de este compuesto pueden generar la inhibición del crecimiento celular (Wan *et al.*, 2014), lo cual posiblemente fue lo que ocurrió en este tratamiento.

El acetato de sodio es un precursor del crecimiento celular (Cifuentes *et al.*, 2003; Giannelli *et al.*, 2015; Wan *et al.*, 2014), como se observa en el tratamiento con 0,299 mg/L, el cual reportó un crecimiento de $2,0 \times 10^4$ cel/mL y una velocidad de crecimiento de 0,029 cel/día, lo que contribuye a una mayor acumulación de astaxantina. Estos hallazgos son consecuentes con lo mencionado por Park *et al.* (2014), quienes desarrollaron sus tratamientos con un fotobiorreactor tipo APBR en sistema *batch* bajo las mismas condiciones del presente estudio.

Por otra parte, es posible afirmar que con las concentraciones de acetato de sodio analizadas (0,299 y 1,6 mg/L) se obtiene una mejor tasa de crecimiento, con recuentos de $2,0 \times 10^4$ cel/mL y $3,5 \times 10^4$ cel/mL, respectivamente. Al respecto, el trabajo de González *et al.* (2009) solo pudo obtener un incremento entre $1,0 \times 10^4$ y $1,8 \times 10^4$ cel/ml, lo que nos lleva a validar que la suplementación de medios con acetato de sodio contribuye a incrementar el crecimiento celular y a la conformación de formas celulares quísticas, ya que la microalga toma el acetato de sodio como una fuente de carbono (González *et al.*, 2009).

Aunque se obtuvo un mayor recuento celular que en otros estudios con suplementación con acetato de sodio (Shakhmatov *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2014), se observa que los recuentos celulares entre los días 15 y 20 estuvieron en un rango de $2,0 \times 10^4$ a 5×10^3 cel/mL para el tratamiento con 0,299 mg/L, mientras que el tratamiento con 1,6 mg/L reportó un rango entre $2,5 \times 10^4$ y 5×10^3 cel/mL, lo cual se puede explicar de dos formas diferentes. En primer lugar, se puede afirmar que el microorganismo simplemente siguió su ciclo natural de crecimiento de aproximadamente 15 días (Jeon *et al.*, 2006; Ranga *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2016), como lo describe la literatura. De otro lado, de acuerdo con lo establecido por Woong *et al.* (2006), la concentración de acetato de sodio deberá ser controlada a niveles apropiados con el fin de evitar la inhibición del crecimiento celular por acción de este compuesto. Estos autores establecen que a través de concentraciones de acetato de sodio de 50 mM es posible obtener un rápido cambio morfológico de células vegetativas a forma quística, realizando el blanqueamiento total de las células quísticas (Wan *et al.*, 2014), lo que nos lleva a cuestionar si la adecuada concentración de acetato de sodio es 0,310 mg/L (Giannelli *et al.*, 2015). Teniendo en cuenta estas dos perspectivas, se estudiaron ambas concentraciones en el biorreactor Tecferm de 5 Litros a fin de establecer cuál de ellas es la más adecuada para la obtención de astaxantina (García, 2018).

Un factor a resaltar es que la mayoría de los estudios suplementados con acetato de sodio tienden a registrar una mayor producción de biomasa que de astaxantina, como se observó en el presente estudio. De esta manera, se puede hacer referencia a los autores que han descrito anteriormente que las células de *H. pluvialis* solo requieren carbono como principal nutriente en la “etapa de crecimiento”, el cual puede ser suministrado diariamente por inyección de CO₂ o por aire filtrado (como en el presente estudio), y que una alta irradiación (fotoperíodos 20 h luz y 4 h oscuridad) proporciona mayor energía para la fijación fotosintética del carbono, lo que conduce a una mayor tasa de síntesis de astaxantina (Wang *et al.*, 2013). Con base en lo anterior, se puede deducir que en este experimento hubo una adecuada fijación fotosintética debido a que el biorreactor Tecferm presenta una forma tubular que hace que la luz se distribuya a todo el cultivo, lo cual, posiblemente, fue un factor

determinante en la producción de biomasa adecuada de *H. pluvialis*.

Actualmente, compañías dedicadas a la producción comercial de astaxantina a partir de microalgas (Cyanotech y Aquasearch) recurren a un sistema compuesto por dos etapas. La primera de ellas, conocida como “etapa verde”, consiste en producir biomasa verde en condiciones óptimas de crecimiento. La segunda, denominada “etapa roja”, inicia cuando la microalga es expuesta a condiciones ambientales adversas para inducir la acumulación de astaxantina (Wang *et al.*, 2013). Es aquí donde la suplementación con acetato de sodio puede ser implementada desde el día 15, debido a que esto contribuye a un rendimiento adecuado en cuanto a la producción de biomasa y la formación de quistes, los cuales son la forma celular adecuada para la acumulación de astaxantina.

En cuanto a la concentración de astaxantina, para el tratamiento con 0,299 mg/L de acetato de sodio la mayor concentración de astaxantina se obtuvo en el día 20, siendo igual a 2,530 µg/mL, posteriormente alcanzando una cifra de 1,161 µg/mL en el día 34. Por su parte, con el tratamiento con 1,6 mg/L se obtuvo una elevada concentración de astaxantina en el día 13, equivalente a 1,991 µg/mL, que para el día 34 llegó a 1,5 µg/mL. Estos resultados pueden ser correlacionados perfectamente con el recuento celular obtenido para esos días. Por otro lado, en cuanto a la concentración de clorofila sucedió algo similar, ya que el tratamiento de 0,299 mg/L registró una mayor concentración en el día 20, con 28,706 µg/mL, y en el día 34 alcanzó una cifra de 16,637 µg/mL. Finalmente, para el tratamiento con 1,6 mg/L se halló una mayor concentración en el día 13, con 17,402 µg/mL, resultado que llegó a 6,752 µg/mL en el día 34.

Aunque la concentración de clorofila fue disminuyendo a medida que se acercaba el final del estudio, la concentración de astaxantina iba en aumento, lo cual era lo realmente importante del proyecto. No obstante, se observó que durante todo el estudio en ambos tratamientos la clorofila y la astaxantina fueron inversamente proporcionales, lo que coincide con lo descrito por la mayoría de los autores consultados (Camacho-Kurmen *et al.*, 2013; Infant-Santhose *et al.*, 2014; & Wang *et al.*, 2013). Así, se reafirma que el estudio puede ser llevado en “etapa verde” hasta el día 20, ya que en este se obtiene una buena producción

de biomasa. Después de este día se puede suministrar inyecciones directas de CO₂, acetato de sodio y alta irradiancia con fotoperíodos de 20 h luz y 4 h oscuridad con el fin de generar el estrés indicado para la iniciación de la “etapa roja”. Con ello, las células dan inicio al verdadero estrés y la acumulación de astaxantina, por lo que a futuro se genera una buena obtención de esta.

Las inyecciones de CO₂ también pueden ser sustentadas gracias a que contribuyen a regular el pH, lo que es un claro ejemplo de lo observado en el tratamiento con 1,6 mg/L de acetato de sodio, donde el aumento de pH fue una posible causa de que la velocidad de crecimiento celular fuera menor, en comparación al tratamiento con 0,299 mg/L, el cual presentó un pH más neutral y una mejor velocidad de crecimiento celular. Por esta razón, se sugiere que la inyección directa de CO₂ o adición de bicarbonato de sodio se sume a las condiciones de trabajo para los estudios de escalamiento de *H. pluvialis*.

Todos los resultados obtenidos hasta el día 20 se deben a la etapa de crecimiento o “etapa verde”, que generalmente dura de 9 a 20 días, según la relación entre la biomasa celular y la actividad celular. Este hecho se pudo evidenciar en el estudio debido a que fue en este período en el que se obtuvo un mayor crecimiento celular. Posteriormente, llegando a la etapa de acumulación de astaxantina o “etapa roja”, la morfología de aplanospora cambia por la disminución de nutrientes. De esta manera, se deduce que para obtener mejores resultados se puede ensayar la aplicación de acetato de sodio a partir del día 15 o 20, y no desde el primer día, puesto que los estudios que han reportado mejores rendimientos han aplicado el estímulo desde el día 15, sin importar su fuente de carbono (Camacho-Kurmen *et al.*, 2013).

Con el uso de biorreactores de 500 mL, donde se trabajó con 5 tratamientos usando los factores de estrés acetato de sodio, cloruro de sodio y alta irradiancia y un control (RM1), se estableció en las curvas de crecimiento de la microalga *H. pluvialis* que la fase exponencial se presentó en diferentes días del estudio. Se utilizó también el medio RM, el cual provee los nutrientes adecuados para el crecimiento de *H. pluvialis*, como lo han reportado Leiton-Arcos (2018), Imamoglu *et al.* (2007) y Niño-Castillo *et al.* (2017). En este estudio se observó que el mayor

conteo celular fue de $2,69 \times 10^5$ cel/mL en medio RM1 (control), seguido por $1,45 \times 10^6$ cel/mL, correspondiente al tratamiento RM6, al cual se le adicionó 0,320 mg/L de acetato de sodio y 1,28 mg/L de cloruro de sodio en el día 15 del cultivo. Así, se concluye que estas concentraciones de sales no logran el estrés suficiente para inhibir el crecimiento celular. De otro lado, el análisis de varianza (ANOVA) de crecimiento celular para los cinco tratamientos y el control identificó diferencias significativas entre estos ($P < 0,05$), con una confianza del 95 %.

El estudio de Goksan *et al.* (2010), donde se utilizó acetato de sodio (1 g/l) para comparar si se debía añadir este compuesto junto con los nutrientes orgánicos al comienzo del cultivo, como en la mixotrofia tradicional (MT), o al final de la fase logarítmica en modo fotótrofo, como mixotrofia alternativa (MA), concluyó que el peso seco (DW), los pigmentos y el número de células, particularmente, fueron más altos en la mixotrofia alternativa que en la tradicional (Infant-Santhose *et al.*, 2014; Rodríguez, 2019).

Al respecto, en esta investigación el número de células en MA pasó de $2,17$ a $4,29 \times 10^5$ cel/mL durante 5 días de exposición a acetato de sodio (casi el doble), mientras que en MT este incremento fue de solo 1,2 veces. Esto indica que en próximos estudios podría ser más eficiente agregar el acetato de sodio de una forma mixotrófica alternativa (MA), es decir, al final de la fase exponencial, ya que así se puede minimizar el riesgo de contaminación debido a la menor exposición de las células a las fuentes de carbono orgánico; sobre todo si el objetivo es obtener el máximo recuento posible de la microalga. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la concentración de acetato de sodio adicionado, puesto que en el tratamiento donde se usó 1,6 mg/L de acetato de sodio desde el inicio del cultivo y la adición de cloruro de sodio a los 15 días mejoró la producción de astaxantina, lo que se debe a que el acetato de sodio fue utilizado como fuente de carbono, generando así una mayor producción de biomasa, que luego fue estresada con la combinación de cloruro de sodio y luz blanca alta con fotoperíodo de 20 h luz:4 h oscuridad e irradiancia de 75 lux. En contraste, en el tratamiento donde se utilizó el estrés con acetato de sodio, cloruro de sodio y luz alta con el fotoperíodo mencionado no se logró una buena biomasa ni una buena producción de astaxantina, registrando

una disminución de 71 % en su contenido. Lo anterior permite observar el impacto de la concentración de acetato de sodio de 1,6 mg/L sobre el crecimiento celular del *H. pluvialis*.

En los medios de cultivo macroscópicamente se observa un cambio de color rojizo en el medio RM3 desde el día 1 y en los medios RM2, RM5 y RM6 en el día 24, hallazgos congruentes con la observación microscópica realizada para analizar la evolución de la morfología de la microalga mediante su proceso de producción de astaxantina, observándose cambios morfológicos desde las formas vegetativas verdes hasta las aplanosporas y las formas enquistadas con color rojo. Estos resultados van en línea con lo reportado por Su *et al.* (2014), quienes tras someter a la microalga a condiciones de estrés con alta intensidad de luz y la aplicación de acetato de sodio lograron evidenciar que a los dos días las células se volvían ligeramente rojizas, indicando así la transición a aplanospora.

Con respecto a los resultados obtenidos para la producción de astaxantina, se logra evidenciar un aumento en el contenido de este pigmento, así como una disminución de la concentración de clorofila. Estos hallazgos soportan los resultados de Vidhyavathi *et al.* (2008), quienes tras 9 días de experimentación bajo condiciones de estrés reportan que el contenido total de clorofila en los tratamientos analizados fue 90 % menor que el contenido de células móviles verdes registrado al inicio de su investigación.

Por su parte, el estudio de Wayama *et al.* (2013) realizó una evaluación volumétrica cuyo resultado logró evidenciar cambios drásticos en la transición entre la etapa verde y la etapa roja. En la etapa verde, los cloroplastos representaron 41,7 % del volumen total de células, mientras que el volumen total de astaxantina fue de 0,2 %, observando cloroplastos altamente desarrollados en la periferia y pocos gránulos de astaxantina rodeando el núcleo. En la etapa roja, las gotas de aceite que contenían astaxantina predominaron, con un 52 %, y el volumen total de cloroplastos disminuyó a 9,7 %, observándose gotas de aceite grandes en toda la célula y cloroplastos altamente degenerados y localizados en el espacio intermedio entre las gotas de aceite, lo que les daba una apariencia de color rojo. Es importante aclarar que los cloroplastos no desaparecieron

completamente, lo cual pudo deberse a que estos serían utilizados en una recuperación rápida cuando las condiciones ambientales se reestablecieran y la descomposición de clorofila fuera inducida por la deficiencia de nutrientes (Wayama *et al.*, 2013), lo cual también se observó en esta investigación (Rodríguez, 2019).

Según los resultados obtenidos, el medio RM3, al cual se le adicionó 1,6 mg/L de acetato de sodio desde el inicio del cultivo y una adición de 6,4 mg/L de cloruro de sodio el día 15, presentó la mayor producción de astaxantina, con una concentración de 7,3 µg/L, que es congruente con los resultados obtenidos por Domínguez-Bocanegra *et al.* (2004), quienes utilizaron 1 g/L de acetato de sodio junto con iluminación continua, obteniendo una producción máxima de astaxantina de 98 mg/g de biomasa. Así mismo, estos hallazgos son equiparables con los resultados de Cifuentes *et al.* (2003), quienes buscaron establecer condiciones óptimas para la producción de biomasa y astaxantina al someter a la microalga a condiciones mixotróficas (acetato de sodio con concentraciones de 4, 8 y 12 mM, alta irradiancia de luz y cloruro de sodio al 0,8 %), con lo que obtuvieron un contenido de astaxantina por peso seco de 10,3 mg g⁻¹ (1 % p/p), identificando además que la adición simultánea de acetato de sodio/NaCl en una concentración de 4,4/17,1 mM aumenta la producción de astaxantina.

Según el análisis de expresión de genes relacionados con la producción de carotenoides durante la inducción de estrés realizado por Vidhyavathi *et al.* (2009), la adición de acetato de sodio y cloruro de sodio produce una transcripción temprana y una regulación máxima positiva de genes como BKT (β-caroteno cetolasa), el cual se encarga de la transformación de zeaxantina a adonixantina y de adonixantina a astaxantina, desde tres días de estrés hasta tres meses después (Vidhyavathi *et al.*, 2008). Esto explicaría los resultados obtenidos en esta investigación, donde se observa una mayor producción de astaxantina al someter la microalga a estrés salino, ya que, como se mencionó previamente, la combinación de estos dos factores de estrés con la alta irradiancia con luz blanca (Tlt 20w/54RS marca Philips) y fotoperíodo de 4 horas oscuridad y no 6 horas oscuridad, aumenta la producción de este compuesto, considerando que estos carotenoides

se acumulan en estructuras especiales tales como plastoglobulos de plástidos o cuerpos lipídicos citoplasmáticos, jugando un papel importante en la prevención del exceso de la energía lumínica del alcance de la maquinaria fotosintética (Richmond & Hu, 2013; Rodríguez, 2019).

Esta investigación destaca la importancia del uso del biorreactor Tecferm de 5 litros para producir biomasa de la microalga, ya que bajo las condiciones trabajadas se obtuvo una biomasa adecuada, la cual, una vez finalizada su fase exponencial, puede ser sometida a factores de estrés con acetato de sodio y cloruro de sodio combinados con alta irradiancia, con lo que se puede obtener una mayor producción de astaxantina.

CONCLUSIONES

Los biorreactores de sistemas cerrados, como el utilizado en este estudio (biorreactor Tecferm de 5 Litros), proporcionan condiciones adecuadas para el crecimiento de la microalga *H. pluvialis* debido a que protegen el cultivo de la contaminación y controlan las condiciones de cultivo, permitiendo obtener una concentración de astaxantina de 2,530 µg/mL a través del uso de 0,299 mg/L de acetato de sodio. La mayor productividad de astaxantina (7,325 µg/mL) fue obtenida con la combinación de 1,6 mg/L de acetato de sodio desde el inicio del cultivo y la adición de cloruro de sodio (6,4 mg/L) a los 15 días del cultivo, con un incremento de 65 % mediante el uso de biorreactores de 500 mL. A partir de estos resultados, se establece la factibilidad tecnológica de cultivar inicialmente la microalga utilizando el biorreactor Tecferm de 5 litros, para luego de su fase exponencial someterla a factores de estrés combinando el uso de acetato de sodio, cloruro de sodio y luz de alta intensidad.

AGRADECIMIENTOS

A Laura M. García y Laura Johanna Rodríguez R., a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca por el apoyo en la realización de este proyecto, y a la Universidad de La Sabana, Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales (GIPA).

REFERENCIAS

- American Public Health Association [APHA]. (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (18 ed.). American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Pollution Control Federation (WPCF).
- Camacho-Kurmen, J. E., González, G., & Klotz, B. (2013). Astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* under different stress conditions. *Nova*, *11*(19), 94-104. <https://doi.org/10.22490/24629448.1022>
- Cifuentes, A., González, M., Vargas, S., Hoeneisen, M., & González N. (2003). Optimization of biomass, total carotenoids and astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* Flotow strain Steptoe (Nevada, USA) under laboratory conditions. *Biol Res.*, *36*, 343-357. <https://doi.org/10.4067/S0716-97602003000300006>
- Domínguez-Bocanegra, A. R., Legarreta, I. G., & Jeronimo, F. M. (2004). Campocoso AT. Influence of environmental and nutritional factors in the production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Bioresource Technology*, *92*(2), 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.04.001>
- García, M. L. (2018). *Producción biotecnológica de astaxantina a partir Haematococcus pluvialis*. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Giannelli, L., Yamada, H., Katsuda, T., & Yamaji, H. (2015). Effects of temperature on the astaxanthin productivity and light harvesting characteristics of the green alga *Haematococcus pluvialis*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *119*(3), 345-350. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.09.002>
- Goksan T, Ak, I., & Gokpınar, S. (2010). An alternative approach to the traditional mixotrophic cultures of *Haematococcus pluvialis* Flotow (Chlorophyceae). *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *20*(9), 1276-1282. <https://doi.org/10.4014/jmb.0909.09005>
- Gómez, L., Orozco, M. I., Quiroga, C., Díaz, J. C., Huérfano, J., Díaz, L. E., Rodríguez, J., & Camacho, J. E. (2019). Producción de astaxantina y expresión de genes en *Haematococcus pluvialis*

- (Chlorophyceae, Volvocales) bajo condiciones de estrés por deficiencia de nitrógeno y alta irradiancia. *Mutis*, 9(2), 7-24. <https://doi.org/10.21789/22561498.1532>
- González, M. A, Cifuentes, A. S, & Gómez, P. I. (2009). Growth and total carotenoid content in four Chilean strains of *Haematococcus pluvialis* Flotow, under laboratory conditions. *Gayana Botanica*, 66(1), 58-70. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432009000100006>
- He, B., Hou, L., Dong, M., Shi, J., Huang, X., Ding, Y., Cong, X., Zhang, F., Zhang, X., & Zang, X. (2018). Transcriptome analysis in *Haematococcus pluvialis*: Astaxanthin induction by high light with acetate and Fe²⁺. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1), 175. <https://doi.org/10.3390/ijms19010175>
- Imamoglu, E., Vardan-Sukan, F., & Conk-Dalay, M. (2007). Effect of different culture media and light intensities on growth of *Haematococcus pluvialis*. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 1(3), 5-9. <https://doi.org/10.1007/s11738-002-0058-9>
- Infant-Santhose, B., Elumalai, S., & Rajesh-Kanna, G. (2014). Airlift photobioreactor cultivation of a new strain of *Haematococcus pluvialis* collected from high altitude regions of Himalayas. *International Journal of Science and Research*, 3(10), 2289-2292.
- Jeon, Y. C, Cho, C. W., Yun, Y. S. (2006). Combined effects of light intensity and acetate concentration on the growth of unicellular microalga *Haematococcus pluvialis*. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(3), 490-495. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.12.021>
- Lababpour, A., & Lee, C. G. (2006). Simultaneous measurement of chlorophyll and astaxanthin in *Haematococcus pluvialis* cells by first-order derivative ultraviolet-visible spectrophotometry. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 104-110. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.104>
- Leiton-Arcos, Y. A. (2018). *Producción de Haematococcus pluvialis en el biorreactor Tecferm de 5 L en medios de cultivo RM y BBM*. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Lv, H., Xia, F., Liu, M., Cui, X., Wahid, F., & Jia, S. (2016). Metabolomic profiling of the astaxanthin accumulation process induced by high light in *Haematococcus pluvialis*. *Algal Research*, 20, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.019>
- Ma, R., Thomas-Hall, S. R., Chua, E. T., Alsenani, F., Eltanahy, E., Netzel, M. E., Netzel, G., Lu, Y., & Schenk, P. M. (2018). Gene expression profiling of astaxanthin and fatty acid pathways in *Haematococcus pluvialis* in response to different LED lighting conditions. *Bioresource Technology*, 250, 591-602. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.094>
- Niño-Castillo, C. M., & Rodríguez-Rivera F. C. (2015). *Evaluación de las condiciones de crecimiento celular y factores de estrés para la producción de astaxantina a partir de la microalga Haematococcus pluvialis*. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Niño-Castillo, C. M., Rodríguez-Rivera, F. C., Díaz, L. E., & Lancheros-Díaz, A. G. (2017). Evaluation of cell growth conditions for the astaxanthin production as of *Haematococcus pluvialis*. *Microalgae Nova*, 15(28), 19-31. <https://doi.org/10.22490/24629448.2073>
- Pan-utai, W., Parakulsuksatid, P., & Phomkaivon, N. (2017). Effect of inducing agents on growth and astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis*: organic and inorganic. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 12, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.10.004>
- Park, J. C., Choi, S. P., Hong, M. E., & Sim, S. J. (2014). Enhanced astaxanthin production from microalga *Haematococcus pluvialis* by two-stage perfusion culture with stepwise light irradiation. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37(10), 2039-2047. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1180-y>

- Ramírez-Landínez, D. M. (2013). *Evaluación del crecimiento y producción de astaxantina por Haematococcus pluvialis en un fotobiorreactor tipo airlift* (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio UN.
- Ranga, R., Sarada, A., Baskaran, V., & Ravishankar, G. (2009). Identification of carotenoids from green alga *Haematococcus pluvialis* by HPLC and LC-MS (APCI) and their antioxidant properties. *J Microbiol Biotechnol.*, *19*, 1333-1341
- Richmond, A., & Hu, Q. (eds.). (2013). *Handbook of microalgal culture*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118567166>
- Rodríguez, R. L. J. (2019). *Producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis bajo efecto de factores de estrés como acetato de sodio y cloruro de sodio combinadas con alta intensidad de luz*. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Sugawara, T., & Maoka, T. (2021). *Marine carotenoids*. MDPI.
- Shah, M. M. R., Liang, Y., Cheng, J. J., & Daroch, M. (2016) Astaxanthin-producing green microalga *Haematococcus pluvialis*: From single cell to high value commercial products. *Front Plant Sci.*, *28*(7), 531. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00531>
- Shakhmatov, A. S., Pavlovskiy, E. V., & Paukov, A. G. (2018). Desmid algae (Charophyta: Conjugatophyceae) of Ekaterinburg, Middle Urals, Russia. *Folia Cryptogamica Estonica*, *55*, 7-15. <https://doi.org/10.12697/fce.2018.55.02>
- Su, Y., Wang, J., Shi, M., Niu, X., Yu, X., Gao, L., Zhang, X., Chen, L., & Zhang, W. (2014). Metabolomic and network analysis of astaxanthin-producing *Haematococcus pluvialis* under various stress conditions. *Bioresource Technology*, *170*, 522-529. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.018>
- The University of Texas at Austin (UTEX). (2019, septiembre 20). *Algae culturing medium*. <https://utex.org/products/volvox-medium>
- Tocquin, P., Fratamico, A., & Franck, F. (2012). Screening for a low-cost *Haematococcus pluvialis* medium reveals an unexpected impact of a low N/P ratio on vegetative growth. *Journal of Applied Phycology*, *24*(3), 365-373. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9771-3>
- Vásquez-Perea, Y., Villamil-Poveda, J., Sánchez-Leal, L., & Lancheros-Díaz, A. (2014). Evaluación de un sistema de medio fijo como soporte para una película microbiana capaz de reducir Cr (VI) de lodos residuales de curtiembres. *g*, *12*(21), 57-66. <https://doi.org/10.22490/24629448.996>
- Vidhyavathi, R., Venkatachalam, L., Sarada, R., & Ravishankar, G. A. (2008). Regulation of carotenoid biosynthetic genes expression and carotenoid accumulation in the green alga *Haematococcus pluvialis* under nutrient stress conditions. *Journal of Experimental Botany*, *59*(6), 1409-1418. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern048>
- Vidhyavathi, R., Sarada, R., & Ravishankar, G. A. (2009). Expression of carotenogenic genes and carotenoid production in *Haematococcus pluvialis* under the influence of carotenoid and fatty acid synthesis inhibitors. *Enzyme and Microbial Technology*, *45*(2), 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.05.005>
- Wan, M., Zhang, J., Hou, D., Fan, J., Li, Y., Huang, J., & Wang, J. (2014). The effect of temperature on cell growth and astaxanthin accumulation of *Haematococcus pluvialis* during a light-dark cyclic cultivation. *Bioresource Technology*, *167*, 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.030>
- Wang, J., Han, D., Sommerfeld, M. R., Lu, C., & Hu, Q. (2013). Effect of initial biomass density on growth and astaxanthin production of *Haematococcus pluvialis* in an outdoor photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*, *25*(1), 253-260. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9859-4>
- Wang, N., Guan, B., Kong, Q., Sun, H., Geng, Z., & Duan L. (2016). Enhancement of astaxanthin production from *Haematococcus pluvialis* mutants by three-stage mutagenesis breeding.

Journal of Biotechnology, 236, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.08.009>

Wayama, M., Ota, S., Matsuura, H., Nango, N., Hirata, A., & Kawano, S. (2013). Three-dimensional ultrastructural study of oil and astaxanthin accumulation during encystment in the green alga *Haematococcus pluvialis*. *PloS One*, 8(1), e53618. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053618>

Woong, C., Jeon, Y., & Sang, Y. (2006). Combined effects of light intensity and acetate concentration on the growth of unicellular microalga *Haematococcus pluvialis*. *Rev Enzyme and Microbial Technology*, 39(3), 490-495. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.12.021>

Xi, T., Kim, D. G., Roh, S. W., Choi, J. S., & Choi, Y. E. (2016). Enhancement of astaxanthin production using *Haematococcus pluvialis* with novel LED wavelength shift strategy. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(14), 6231-6238. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7301-6>

Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca, Colombia*

Pre-feasibility Study of a Small Hydroelectric Plant in El Sisga Reservoir, Cundinamarca, Colombia

Nicolás Humberto Pacheco Garzón^a, Jesús Ernesto Torres Quintero^b

^a Auxiliar de investigación programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre, Colombia | nicolash-pachecog@unilibre.edu.co

^b Ingeniero civil especializado en recursos hidráulicos con énfasis en hidrología. M. Sc. recursos hidráulicos. Docente investigador, Universidad Libre, Colombia. jesuse.torresq@unilibre.edu.co | <https://orcid.org/0000-0003-1611-3707>

* Artículo derivado del proyecto de investigación "Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca", del grupo de investigación TECNOAMBIENTAL.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo establecer la viabilidad de instalar una pequeña central hidroeléctrica (PCH) en el Embalse del Sisga, dado que este cuenta con características topográficas e hidrológicas que pueden convertirlo en un generador de energía sin poner en riesgo el abastecimiento del recurso hídrico ni los activos ambientales de la zona. Los criterios para cumplir con este objetivo fueron establecidos al realizar estudios cartográficos, determinando el salto hidráulico y el recorrido de la tubería en el proyecto, junto con estudios hidrológicos, los cuales permitieron conocer el caudal de diseño y la capacidad energética. La selección de los componentes hidrológicos se llevó a cabo con base en los estudios anteriores, para finalmente estimar los impactos en las categorías ambientales y en el componente socioeconómico y cultural en el área de influencia del proyecto. A partir de este estudio de prefactibilidad se pudo observar como una PCH en el Embalse del Sisga podría ser instalada de forma óptima y eficiente, sin incurrir en altos costos de instalación y operación, destacando además los beneficios de una PCH y los bajos impactos ambientales negativos de realizar este proyecto.

Citation: Pacheco-Garzón, N. H. y Torres-Quintero, J. E. (2021). Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca. *Mutis*, 11(2), 84-95. <https://doi.org/10.21789/22561498.1785>

Recibido: 10 de mayo de 2021. **Aceptado:** 30 de junio de 2021.

Copyright: ©2021. Pacheco-Garzón, N. H. y Torres-Quintero, J. E. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

drúlicos se llevó a cabo con base en los estudios anteriores, para finalmente estimar los impactos en las categorías ambientales y en el componente socioeconómico y cultural en el área de influencia del proyecto. A partir de este estudio de prefactibilidad se pudo observar como una PCH en el Embalse del Sisga podría ser instalada de forma óptima y eficiente, sin incurrir en altos costos de instalación y operación, destacando además los beneficios de una PCH y los bajos impactos ambientales negativos de realizar este proyecto.

Palabras clave: fuentes de energía renovable, generación de energía hidroeléctrica, pequeña central hidroeléctrica.



ABSTRACT

This work aims to establish the feasibility of installing a small hydroelectric power plant (SHPP) in the Sisga reservoir, given that this body of water has topographical and hydrological characteristics that can turn it into an energy generator without jeopardizing the supply of water resources or the environmental assets in this area. The criteria for meeting this objective were established after conducting cartographic studies that determined the hydraulic jump and the route of the pipe in the project, as well as hydrological studies that allowed us to know the design flow and energy capacity. The selection of hydraulic components was determined based on the results of the previous studies, to finally estimate the impacts on the environmental categories and on the cultural and socio-economic component in the area of influence of the project. From this pre-feasibility study, it was possible to observe how a SHPP in the Sisga reservoir could be installed optimally and efficiently without incurring in high installation or operational costs, highlighting the benefits of a SHPP and the low negative environmental impacts of this project.

Keywords: Renewable energy sources, hydroelectric power generation, small hydroelectric power plant.

INTRODUCCIÓN

El mundo busca cubrir de manera eficiente la demanda de energía eléctrica a través de tecnologías limpias, con el fin de disminuir la contaminación atmosférica generada por las centrales térmicas y las alteraciones ambientales derivadas de la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas, además de evitar el desabastecimiento eléctrico como consecuencia de las irregularidades que sufren las centrales hidroeléctricas debido a fenómenos climáticos.

Una tecnología altamente conocida en el mundo son las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), caracterizadas por tener una gran variedad de capacidades instaladas y ser amigables con el medioambiente, además de tener una gran versatilidad de instalación (Fundación Solar, 2018). Las PCH brindan la ventaja de no requerir altas caídas ni grandes caudales de agua, por lo cual no generan altos impactos, como sucede con otros métodos de generación. Tanto es así que la Organización Mundial de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI), en el Informe Mundial sobre el Desarrollo de la Pequeña Central Hidroeléctrica 2019, categoriza a las PCH como una tecnología madura y versátil, efectiva para proporcionar acceso a electricidad limpia y sostenible —tanto en los países en vía de desarrollo como en las naciones desarrolladas—, particularmente en las zonas rurales. Mediante el desarrollo de PCH muchos países han tomado medidas para aliviar la pobreza y aumentar el acceso a electricidad (ONUUDI, 2019).

Las PCH tienen varios beneficios frente al uso de energías convencionales. En primer lugar, no utilizan combustibles fósiles para producir energía. Al respecto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, en su informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático, explica cómo las energías alternativas disminuyen considerablemente los gases efecto invernadero (GEI):

Los valores medianos para el conjunto de las energías renovables están situados entre 4 y 46 g de CO₂ eq/kWh, mientras que los combustibles de origen fósil están comprendidos entre 469 y 1.001 g de CO₂ eq/kWh (exceptuando las emisiones debidas a los cambios del uso de la tierra) (IPCC, 2011, p. 18).

Otra ventaja de las PCH es que no alteran en gran proporción los ecosistemas, en comparación con las grandes centrales hidroeléctricas. Esto se debe a que las PCH no necesitan inundar grandes áreas para poder producir energía, por lo que su funcionamiento no se ve afectado por fenómenos como El Niño, puesto que no requieren de altos volúmenes de agua para trabajar. Además, su versatilidad de instalación permite suministrar el servicio de energía a lugares de difícil acceso, ampliando el cubrimiento de la demanda energética.

A partir de los beneficios reportados de las PCH, estas tienen un alto grado de aceptación en el mundo. En algunos países que han ido implementado estas

pequeñas centrales, se ha evidenciado la eficiencia en la producción de energía eléctrica:

En Euskadi, debido a que los ríos son de curso corto y no conducen caudales importantes, existen bastantes minicentrales hidráulicas. En algunos lugares de España hay problemas de escasez de agua y se han construido presas para riego. Posteriormente han sido aprovechadas para generar energía, y actualmente tenemos una fracción importante de energía hidroeléctrica instalada (Torres, 2010, p. 3).

En Sudamérica las PCH gozan de gran aceptación debido a que el continente tiene una enorme capacidad hídrica. Según UNIDO (United Nations Industrial Development Organization), en su informe Word Small Hydropower Development Report 2016:

La capacidad hidroeléctrica total instalada en América del Sur, incluyendo grandes, medianas y pequeñas instalaciones, es de aproximadamente 103 GW. Además, desde el 2013 la capacidad de las PCH ha incrementado un 14 % y la capacidad de instalación ha incrementado un 31 %. Según este informe, las PCH tienen una capacidad instalada en Colombia de hasta 250 MW y un potencial de 25.000 MW. Entre los Informes mundiales de desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas de 2013 y 2016, la capacidad instalada aumentó en un 45 % (UNIDO, 2016, p. 272).

Colombia cuenta con un gran potencial para instalar este tipo de tecnologías gracias a su capacidad hídrica y su relieve característico. Tanto así que con las PCH se inició el desarrollo del sistema eléctrico colombiano, dado que se evidenció que cerca de cada municipio había pequeñas caídas de agua que podrían ser aprovechables para la generación de energía (Vélez-Álvarez, 2020). La implementación de las PCH en otros países, así como la capacidad y el potencial que tiene Colombia para instalar estas tecnologías, respalda la idea de que estas centrales contribuyen a mitigar las diferentes problemáticas antes mencionadas. Por estas razones, la presente investigación busca diseñar y sustentar la viabilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, el cual puede contribuir a satisfacer la demanda de energía eléctrica del país y favorecer a Colombia en la lucha contra el desabastecimiento energético derivado del fenómeno El Niño.

El Embalse del Sisga cuenta con grandes aportes hídricos provenientes de diferentes fuentes. Según Colparques, este cuerpo de agua cuenta con una superficie de 148,2 km² y una capacidad de diseño de 101,2 mm³, la cual ha ido variando debido a la colmatación natural resultado de 53 años de operación, por lo que su capacidad real es de 94,3 mm³, de los cuales 95 % son volumen útil; en otras palabras, 89,6 mm³. Igualmente, estudios de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) han determinado una disminución en el área superficial del embalse, la cual se ha reducido de 653 a 637 hectáreas (Organización Colparques, 2020). Estos aportes hídricos demuestran la capacidad y viabilidad del embalse para producir energía eléctrica por medio de una PCH.

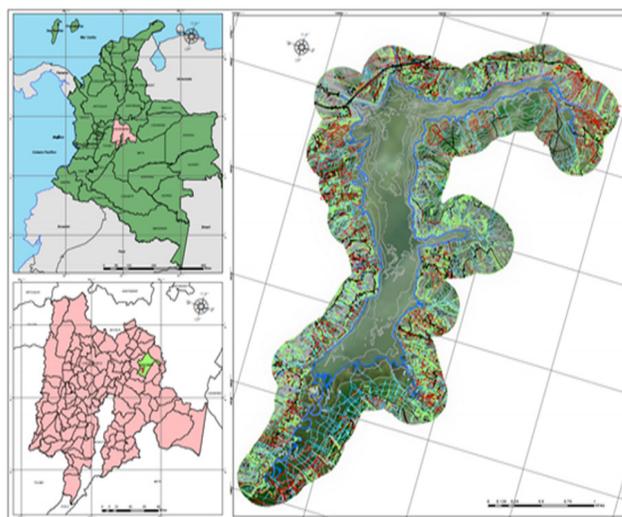
A continuación, se presenta el estudio que busca evaluar los beneficios de instalar una PCH aprovechando las aguas del Embalse del Sisga.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

Como se muestra en la figura 1, el Embalse del Sisga se encuentra localizado en el municipio de Chocontá, Cundinamarca, a 55 km al norte de Bogotá en dirección a Tunja, Boyacá. El embalse se ubica a 2.674 m s. n. m. en la cuenca alta del río Bogotá, a la altura de los municipios de Chocontá, Sesquilé, Guatavita y Machetá. Sus coordenadas son 05° 04' N y 73° 44' E.

Figura 1. Localización del Embalse del Sisga



Fuente: manual de operación Embalse del Sisga.

Según la CAR, en el manual de operación del Embalse del Sisga, el área de este cuerpo de agua se estima en 148,2 km². El embalse tiene un aporte anual medio de 79,5 mm³, equivalente a un caudal medio de 2,52 m³/s, proveniente principalmente del río San Francisco (64 %, aproximadamente); es decir, 1,61 m³/s. La quebrada Granadillo contribuye con 0,40 m³/s, lo que equivale a 16 % de la afluencia total. El caudal restante, que corresponde a 0,46 m³/s, está constituido por el aporte de las lluvias y pequeñas cuencas no instrumentadas que drenan directamente al embalse.

La orografía de la zona donde se encuentra el embalse conforma un paisaje ondulado, cuya altura fluctúa entre 2.700 y 3.400 m s. n. m., formando un valle enmarcado por la cordillera de Suratá, al noreste, y la cordillera de Peña Blanca, al suroccidente.

Las precipitaciones presentes en el área del embalse son producto de la vertiente de la Orinoquía, con influencia del régimen unimodal, que se caracteriza por presentar una temporada lluviosa entre mayo y agosto y un período seco entre diciembre y marzo, aumentando hacia el oriente y suroriente, en donde puede alcanzar hasta 1.300 mm (CAR, 2020). La cuenca hidrográfica en la cual se encuentra el embalse cuenta con calcificaciones climáticas frías, principalmente, y el embalse se encuentra situado en un clima frío semihúmedo. Gran parte de la cuenca contiene clima de páramo bajo semihúmedo (Consorcio Ecoforest Ltda., 2018).

Datos

Para realizar los diferentes estudios en el marco de la investigación fue necesario implementar elementos y herramientas de medición que permitieron la obtención de datos para su posterior análisis, los cuales se describen a continuación.

- Estación hidrometeorológica de la CAR: se obtuvieron los datos de caudales multianuales medios mensuales de la estación hidrometeorológica Embalse Sisga, que mide el caudal de descarga. Los datos suministrados son mediciones que van desde el año 1952 hasta enero de 2021.
- Planchas: se obtuvieron del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (escala 1:25000), donde se podía localizar el Embalse del Sisga con su punto de descarga. Las planchas se adquirieron en formato físico, PDF y en Shapefile, con el fin de

tener mayor versatilidad para trabajar sobre la información. Los números de las planchas son 209VIA y 209VIC.

Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se establecieron 5 aspectos, para los cuales se aplicaron diversos métodos de análisis y dimensionamiento de los parámetros de importancia para una PCH en el área de estudio.

Análisis topográfico

El análisis topográfico consiste en realizar una estimación del salto de agua disponible. En los estudios de prefactibilidad de PCH es bastante común usar los mapas con curvas de nivel (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, 1997), por lo que estos fueron empleados en el presente estudio. A partir de este análisis, fue posible establecer un recorrido viable para el recorrido del agua desde la salida del embalse hasta la casa de máquinas.

Evaluación del recurso hidroenergético

El análisis hidrológico consistió en determinar el caudal disponible para el proyecto y su capacidad de producir energía eléctrica. Para estimar el caudal de diseño se realizó una curva de duración de caudales (CDC), la cual brinda la probabilidad como un porcentaje de tiempo de todo el período de medición, en el que el caudal es igual o menor al caudal correspondiente a dicho porcentaje de tiempo (Ortiz-Flórez, 2011). En este sentido, la frecuencia relativa acumulativa corresponde a la duración en términos de porcentaje. Para calcular la frecuencia de cada rango simplemente se divide el número de ocurrencias entre el número total de aforos, como se observa en la siguiente ecuación:

$$fr(\%) = \left(\frac{F}{N}\right) * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

fr: frecuencia relativa

F: número de ocurrencias

N: número total de aforos.

Por su parte, el caudal medio se determina mediante la siguiente expresión.

$$Qm = \Sigma Qi * fr / 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Qm: caudal medio

Qi: caudal

fr: frecuencia relativa.

A partir del desarrollo de la CDC fue posible realizar una curva de duración de potencias (CDP). Este análisis permite determinar el caudal que aporta mayor energía al sistema, es decir, cuántos kWh podría generar por año. Para trazar la CDP basta con convertir el eje de ordenadas de la CDC en eje de potencias, como se muestra en la siguiente expresión.

$$P = \frac{\gamma * Q * H * \eta}{1000} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

P: potencia

γ : peso específico del agua

Q: caudal de diseño

H: altura neta

η : eficiencia de la turbina.

Selección de componentes hidráulicos y electromecánicos

Esta investigación planteó la selección de la tubería de carga y la casa de máquinas, la cual está compuesta por la turbina y el generador.

Tubería de carga

El material que se seleccionó para la conducción del fluido es el acero. Por medio de la literatura se obtuvieron los coeficientes del conducto, datos necesarios para determinar variables que pueden generar inconvenientes en la conducción. Variables como la velocidad del fluido, la carga y la presión interna en la tubería fueron calculadas y consideradas para obtener un diámetro mínimo en la tubería (Yunus & Cimbala, 2006). Las pérdidas por fricción fueron calculadas para determinar la caída neta del sistema por medio de la ecuación de Hazen-Williams, como se ve a continuación.

$$hf = 10,648 \left(\frac{1}{C_{HW}}\right)^{1.852} * \frac{Q^{1.852}}{D^{4.871}} * L \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

Hf: pérdidas por fricción

C_{HW} : coeficiente de fricción de Hazen-Williams

Q: caudal

D: diámetro

L: longitud de la tubería.

Adicional a lo relacionado anteriormente, se realizó el cálculo del diámetro económico que debería tener la tubería. Este valor es de gran importancia, dado que un diámetro menor supone menores costos de ejecución. Sin embargo, un diámetro menor implica un mayor costo energético debido a las pérdidas de fricción, por lo que los costos de explotación serán más altos. Por esta razón, el diámetro económico será aquel cuya suma de estas dos variables reporte el menor costo para el proyecto (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, 1997).

Casa de máquinas

La casa de máquinas se compone principalmente del generador, la turbina y el tablero de controles, equipos seleccionados a partir del caudal y la altura de caída del agua. La casa de máquinas protege el equipamiento electromecánico de las adversidades climatológicas. El número, tipo y potencia de las turbinas, su disposición con respecto al canal de descarga, la altura de salto y la geomorfología del sitio condicionan el tamaño y la forma de la construcción (Riego, 2020). Algunas características de este tipo de turbinas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características principales de algunas turbinas hidráulicas

Turbina	Caudal (m³/s)	Caída (m)
Pelton	0,05 a 50	30 a 1.800
Francis	1 a 500	2 a 750
Kaplan	100	5 a 80

Fuente: Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (1997).

Análisis energético del sistema

En este análisis se calculó el potencial energético, favoreciendo el sistema por medio de dos turbinas, con el objetivo de analizar las potencias máxima, media y firme; la última hace referencia a la potencia que puede generar el sistema operando con bajo caudal (Gugler Technology for Hydropower Plants, 2020).

Para realizar el estudio se calculó la potencia para cada caudal según su frecuencia, simulando el ingreso del agua a cada turbina, logrando evidenciar su rendimiento y capacidad de generación individualmente. La potencia máxima se calcula directamente con la caída neta y el caudal de diseño establecido en la CDC, como se realizó a través de la ecuación (3). La potencia media son los miles de kWh generados anualmente divididos por la cantidad de horas al año. Por su parte, la generación firme tiene en cuenta la potencia obtenida de los caudales más bajos en el año.

Análisis ambiental

Se realizó un análisis que consiste en relacionar la cantidad de CO₂ que se evitaría al producir energía por medio de una PCH, en comparación con una central termoeléctrica. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética, producir 1 MW de potencia por medio de estas centrales genera alrededor de 0,367 t CO₂ por año (UPME, 2020). Al remplazar la forma de generación de energía por medio de un medio alternativo a la quema de combustible, el proyecto genera impactos positivos en el ambiente. Esto se debe también a que las plantas termoeléctricas producen 30,7 % de la energía eléctrica del país (Acolgen, 2019), ocasionando un fuerte impacto en el ambiente.

Gracias al análisis energético realizado se determinó la producción de energía anual en el sistema. Con este dato es posible calcular con una sencilla relación cuánto CO₂ sería producido por la quema de combustibles fósiles. La siguiente equivalencia muestra como fue calculado el CO₂ producido.

$$TonCO_2 = \frac{0.367 \text{ TonCO}_2 * PA(Mw)}{1 (Mw)} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

PA: producción anual de energía.

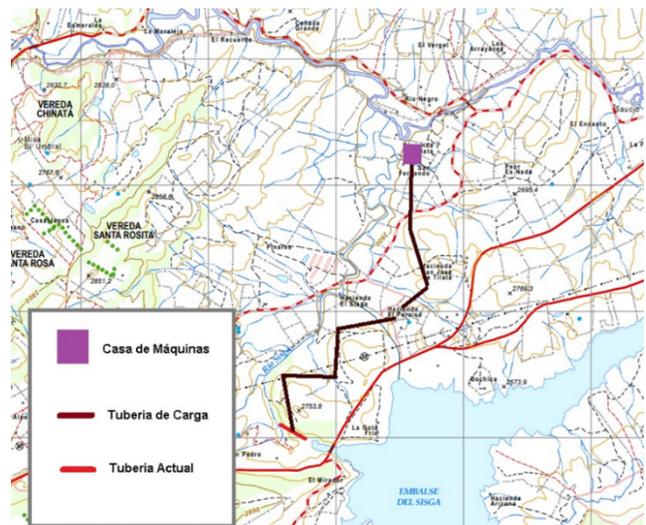
RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología planteada.

Análisis topográfico

Se observó en la plancha 1:25000 el punto donde descarga sus aguas el Embalse del Sigga. A partir de este hallazgo se determinó por curvas de nivel la mayor caída de agua con el fin de identificar el aprovechamiento óptimo de energía potencial y establecer el recorrido de la tubería que transportará el agua a la casa de máquinas. La cota de salida del agua del embalse está a una altura de 2.944,29 m s. n. m., mientras que la cota donde terminaría la tubería de transporte y la descarga de aguas a nivel del río Bogotá se encuentra a una altura de 2.600 m s. n. m., lo que por diferencia representa una caída bruta de agua de 344,29 m. Por otra parte, la longitud del recorrido de la tubería (figura 3) se calculó por medio de la escala del mapa, dando como resultado una longitud de 3.125 m. Esta información resulta importante para determinar las pérdidas por fricción en el sistema.

Figura 2. Recorrido de la tubería en el sistema



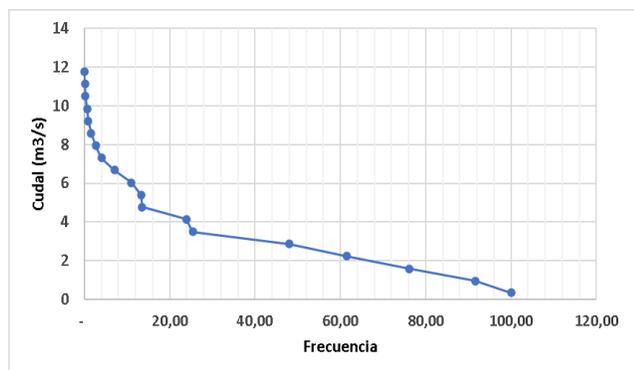
Fuente: elaboración propia.

Evaluación del recurso hidroenergético [T2]

Tras realizar la curva de duración de caudales se logró determinar el caudal medio anual que descarga el embalse, el cual equivale a 2,77 m³/s, valor seleccionado

como caudal de diseño. La figura 3 representa la CDC para la descarga del embalse, donde se puede apreciar la frecuencia acumulada de ocurrencia del caudal determinado. La tabla 2 muestra los caudales correspondientes a diferentes frecuencias, datos obtenidos de la CDC.

Figura 3. Curva de duración del caudal del Embalse del Sisga



Fuente: elaboración propia.

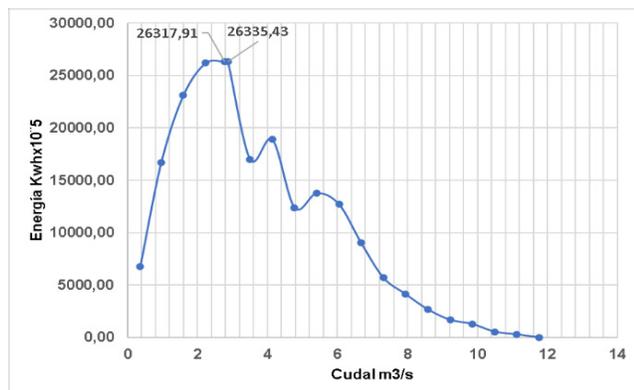
Tabla 2. Frecuencias de diferentes caudales del Embalse del Sisga

Frecuencia	Caudal (m3/s)
100%	0,35
95%	0,7
50%	2,77
5%	7,1163

Fuente: elaboración propia.

A partir del desarrollo de la CDC fue posible realizar una curva de duración de potencias (CDP). Este análisis permite determinar el caudal que aporta mayor energía al sistema (figura 4).

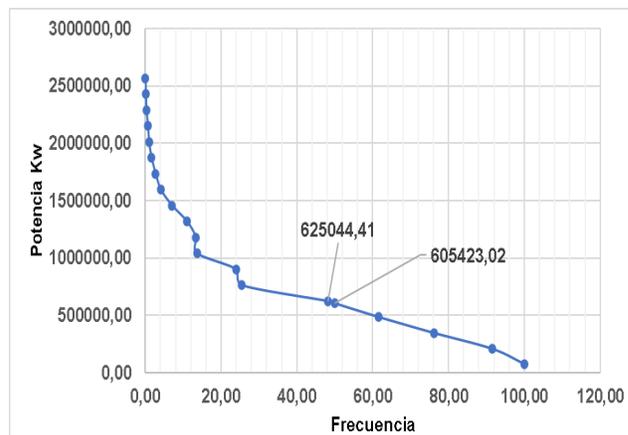
Figura 4. Curva de duración de potencia



Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se aprecia que la máxima energía que podría producirse es de $28.115,75 \text{ Kw/h} \times 10^{-5}$, resultado de un caudal de $2,86 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor de $28.096,95 \text{ Kw/h} \times 10$ corresponde a la energía que puede producir el caudal medio calculado en la CDC, valor tomado como caudal de diseño $2,77 \text{ m}^3/\text{s}$ (Florez, 2011). De otro lado, es posible analizar la CDP relacionando la frecuencia del caudal con la potencia en kW, como se aprecia en la figura 5.

Figura 5. CDP potencia vs. frecuencia



Fuente: elaboración propia.

Al relacionar la potencia y la frecuencia de ocurrencia del caudal se puede apreciar que con un rendimiento de 48% ($2,86 \text{ m}^3/\text{s}$) la potencia equivale a $670.707,62 \text{ kW}$, mientras que para 50% ($2,77 \text{ m}^3/\text{s}$) corresponde a $649.541,91 \text{ kW}$, equivalente al caudal de diseño. Vale la pena resaltar que los datos de las curvas se calculan a partir de un rendimiento de 92% y una altura neta $342,52 \text{ m}$. Estos porcentajes de potencia son producidos en un año.

Selección de componentes hidráulicos y electromecánicos

La tabla 3 presenta los principales parámetros de diseño. Estos se calcularon durante el desarrollo de la investigación y son de gran importancia para establecer las características de los componentes del sistema.

Tabla 3. Parámetros de dimensionamiento

Caudal de diseño	$2,77 \text{ m}^3/\text{s}$
Longitud de la tubería	3.125 m
Perdidas por fricción	23,44 m
Caída bruta	344,29 m
Caída neta	320,85 m

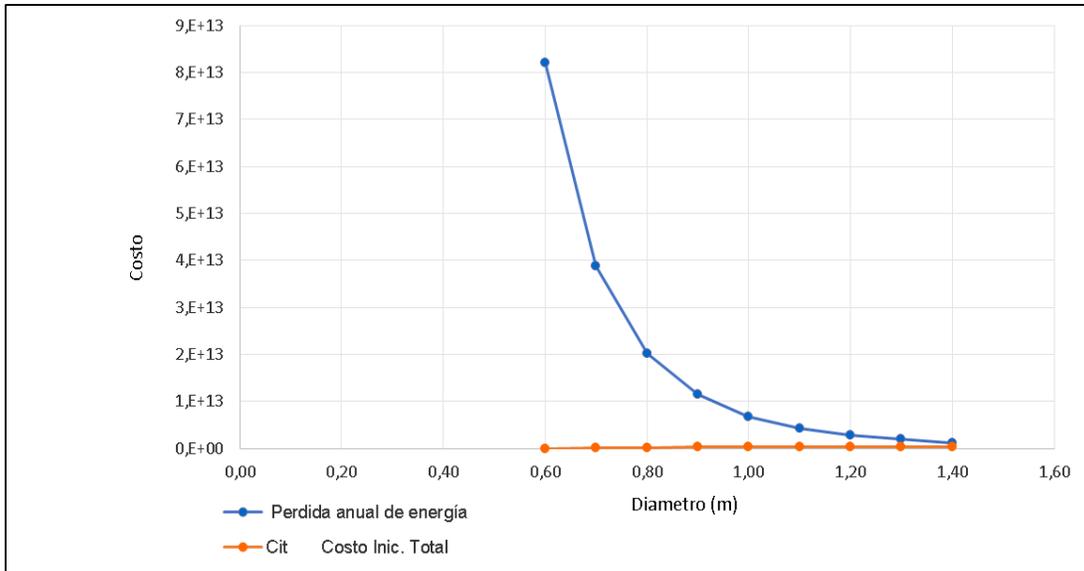
Fuente: elaboración propia.

Tubería de carga

Con los principales parámetros establecidos en los anteriores estudios fue posible determinar el diámetro mínimo que debería tener la tubería, dando como resultado un valor de 0,70 m, teniendo en

cuenta que el material seleccionado fue el acero. Este diámetro permite que el sistema funcione en condiciones estables. En la figura 6 se puede apreciar la evaluación del diámetro económico para las condiciones del proyecto.

Figura 6. Evaluación del diámetro económico



Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se observa la relación entre las pérdidas de energía y los costos para una tubería en acero de diferentes diámetros. La relación inversa entre costo de tubería y pérdidas de energía es notable, por lo que el dato que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto es el de 1,40 m. Este valor corresponde al diámetro que genera las menores pérdidas de energía y el menor costo por valor de materiales. Vale la pena resaltar que para un diámetro de 1,40 m y las condiciones del fluido la velocidad es de 1,8 m/s, la cual no representa un valor que pueda llegar a generar complicaciones en la operatividad de la PCH.

Finalmente, se opta por promediar el diámetro obtenido en este análisis (1,40 m) y el diámetro mínimo calculado anteriormente en los parámetros para una tubería de acero (0,70 m). De esta forma, el diámetro que mejor se ajusta es de 1,05 m.

Casa de máquinas

Para el generador se seleccionaron variables que determinarían el mejor rendimiento del sistema. En la tabla 4 se muestran los valores que se deben tener en cuenta para la selección del generador.

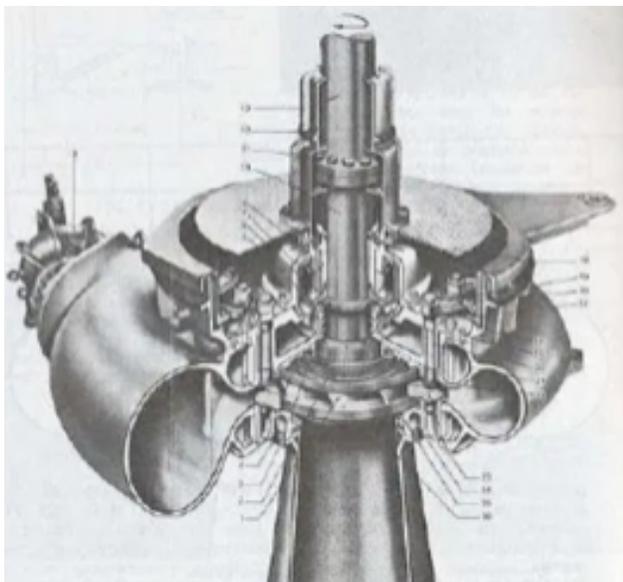
Tabla 4. Datos del generador

Eficiencia	0,95
Coseno Fi (Grados)	0,8
Frecuencia (Ciclos)	60
Pares de polos	4
Velocidad real de rotación (RPM)	514
Diámetro interior Dint (cm)	456,98
Diámetro exterior Dext (cm)	584,89
Altura del generador Hg (cm)	305

Fuente: elaboración propia.

La turbina seleccionada para este proyecto fue tipo Francis, equipo que sirve para trabajar con alturas medias de más de 100 metros y caudales de hasta 30 m³/s. La turbina tipo Francis es catalogada como de reacción, flujo mixto, centrípeto y de admisión total. Sus principales ventajas son las bajas pérdidas hidráulicas, alta eficiencia, alta velocidad específica y bajos costos en acoplamiento con el generador. Este equipo opera a grandes rangos de alturas y caudales. En la figura 7 se puede apreciar el esquema general de instalación de una turbina Francis (Morales *et al.*, 2014). La tabla 5 describe los principales datos de la turbina.

Figura 7. Esquema general de instalación de una turbina Francis



Fuente: Ayala *et al.* (2015).

Tabla 5. Datos de la turbina tipo Francis para el sistema

Tipo	Francis
Eficiencia nt	0,92
Diámetro del Rotor (m)	1,02
Velocidad del Rotor Vt (rpm)	1130
Rapidez de la Turbina ns (rpm)	87
Rotación Especifica nq	26

Fuente: elaboración propia.

La turbina cuenta con un tubo de descarga cónico vertical y un tubo de descarga arrodillado. Las dimensiones de estas estructuras se muestran en las tablas 6 y 7. Los datos calculados para el generador y la turbina, junto con sus partes, son de gran importancia para

entender el dimensionamiento de los equipos necesarios en el sistema.

Tabla 6. Datos del tubo de descarga cónico vertical

Ángulo de ampliación B	6°
Diámetro de entrada De (m)	1,02
Diámetro de salida DS (m)	1,89
Longitud calculada (m)	4,09
Velocidad a la salida del rotor (m/s)	3,36
Velocidad a la salida del tubo (m/s)	0,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Datos del tubo de descarga arrodillado

Sección del cuello en la altura (m)	1,02
Sección de salida en la altura (m)	1,28
Tubo de descarga en la altura Ht (m)	2,66
Longitud de la parte horizontal Lh (m)	5,12
Ancho del tubo arrodillado At (m)	3,74
Profundidad de sumergencia Hs (m)	-102,94
Velocidad en la cámara Vc (m/s)	10,2

Fuente: elaboración propia.

Análisis energético del sistema

El desarrollo del proyecto estimó la generación de energía por medio de diferentes cálculos, teniendo en cuenta la utilización de dos turbinas. En la tabla 8 se pueden apreciar las características de la generación.

Tabla 8. Generación de energía y potencia del sistema

	Dos turbinas
Caudal neto	2,77 m ³ /s
Cabeza estática	344,29 m
Pérdidas en la tubería	23,44 m
Cabeza útil	320,85 m
Potencia máxima	7.628,85 kW
Potencia media	7.438,11 kW
Potencia firme	3.984,23 kW
Factor de utilización	97 %
Generación media anual	65.157,85 miles kWh
Generación firme anual	34.901,89 miles kWh

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que se seleccionan dos turbinas tipo Francis, se obtienen los datos presentados en la tabla 8. Cada turbina trabajará con un caudal de 1,38 m³/s y a su vez puede generar una potencia máxima de 3.814,42 kW, alcanzando hasta 7.628,85 kW. La potencia media con la que trabajará normalmente la casa de máquinas es de 7.438,11 kW. Por último, la potencia firme, que hace referencia a la operación con un caudal bajo, es de 3.984,23 kW.

La tabla 9 describe el comportamiento de generación de cada turbina. En esta tabla se puede observar que la turbina 1 tiene mayor rendimiento de generación, dado que a la turbina 2 ingresa un menor caudal. No obstante, el rendimiento de ambos equipos es óptimo. La generación media anual de potencia, que dio como resultado 65.157,85 kWh, es un dato importante dado que con este valor será posible evaluar el impacto ambiental positivo de este proyecto.

Tabla 9. Cálculo de la generación de energía

Duración (1) %	Caudal río (m ³ /s)	1ª turbina				2ª turbina			
		Caudal turbina (m ³ /s)	Admisión (%)	Rendimiento (2) %	Energía generada (miles kWh)	Caudal turbina (m ³ /s)	Admisión (%)	Rendimiento (%)	Energía generada (miles kWh)
100	0,250	0,25	18	72	50	0,00	0	65	0
99	0,950	0,95	69	72	189	0,00	0	68	0
98	1,580	1,39	100	72	276	0,19	14	70	37
97	2,860	1,39	100	92,5	355	1,39	100	70	267
96	3,490	1,39	100	92,5	355	1,39	100	70	267
95	4,130	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	70	1337
90	4,780	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	70	1337
85	4,130	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	70	1337
80	4,780	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	70	1337
75	5,400	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
70	6,040	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
65	6,670	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
60	7,310	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
55	7,940	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
50	7,940	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
45	8,580	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
40	8,580	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	90	1718
35	9,220	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	92,5	1766
30	9,220	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	92,5	1766
25	9,800	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	92,5	1766
20	10,490	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	92,5	1766
15	11,760	1,39	100	92,5	1773	1,39	100	92,5	1766
10	11,760	1,39	100	92,5	3545	1,39	100	92,5	3532
Energía anual	34.902 kWh					32.029 kWh			
Potencia media	3.984 kW					3.656 kW			
Factor utilización	104 %					96 %			

Fuente: elaboración propia.

Análisis ambiental

Se calcularon las toneladas de CO₂ anuales para la generación de electricidad de este proyecto, obteniendo que al producir 6.515 MW por medio de una PCH se dejarían de producir 2.391 t CO₂ generadas por la quema de combustibles fósiles en una central termoeléctrica. En la tabla 10 se pueden observar los valores correspondientes a la generación de energía anual y su relación con la producción de t de CO₂.

Tabla 10. Producción de energía y ahorro de CO₂

Años	kWh	GWh	MWh
3-5	65.158.000	65.158	6.515,8
6-10	65.158.000	65.158	6.515,8
11-15	65.158.000	65.158	6.515,8
16-20	65.158.000	65.158	6.515,8
21-25	65.158.000	65.158	6.515,8
25-30	65.158.000	65.158	6.515,8
Total		390.948	39.094,8
0,367	t CO ₂	1	MWh
2391.005	t CO ₂	6515	MW

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se determinaron diferentes parámetros para evaluar la viabilidad de instalar una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, aprovechando el caudal de descarga de este cuerpo de agua.

El análisis topográfico determinó el recorrido más conveniente de la tubería, evidenciando pérdidas por fricción considerables. Sin embargo, gracias a la alta caída del agua (344,29 m), el potencial energético se vio beneficiado por esta diferencia entre cotas.

El análisis hidrológico determinó el caudal de diseño y la capacidad energética del mismo. Esta investigación reveló el buen rendimiento del caudal, arrojando una capacidad de producir 649.541,91 kW anuales, con un rendimiento aproximado de 92 %. Estos resultados hacen que la viabilidad del proyecto sea positiva, dado que para una PCH son valores altos de producción. Además, se evidencia que es posible aprovechar

el recurso hídrico del embalse sin afectar los otros usos que la población hace de este.

Al seleccionar la tubería se procuró mantener los menores costos posibles. Por ello, se seleccionó el acero y se determinó el diámetro económico, disminuyendo las pérdidas energéticas y aumentando el ahorro monetario en la instalación de este tipo de proyectos. El estudio muestra que es factible realizar el proyecto sin generar grandes costos por cuenta de la instalación de la tubería.

Se determinó que la producción energética tiende a ser óptima durante el funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo. Esto se debe a que incluso en época de sequía la PCH produciría hasta 34.901,89 kWh como generación firme anual, cifra óptima para una pequeña central con estas características. Esto ayudaría a suplir la demanda energética de otras centrales con problemas de abastecimiento.

Dado que la PCH en el embalse no requiere de muchas estructuras y además aprovecha el recurso hídrico de un cuerpo de agua ya represado, esta no representa cambios significativos para la fauna y flora del área de estudio ni genera impactos negativos en el componente sociocultural de la zona. Por el contrario, el proyecto traería impactos positivos, como una mayor cobertura en el servicio de energía eléctrica y una disminución en la generación de GEI, como se mostró en los resultados del estudio ambiental, generando un ahorro de un poco más de 2.390 t de CO₂

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Investigación TECNOAMBIENTAL y a la Universidad Libre por su colaboración en el desarrollo de la investigación. También agradecen a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) por suministrar información relevante para alcanzar los objetivos de la investigación. Este trabajo es dedicado a la memoria del ingeniero Jesús Ernesto Torres Quintero.

REFERENCIAS

Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica [Acolgen]. (2019). *Acolgen*. <https://www.acolgen.org.co/>

- Ayala, D., Chaverrea, M., Constante, D., Mosquera, D., Navarrete, K., Ramírez, M., Velastegui, S., & Zagal, J. (2015). *Turbina Francis*. Escuela Politécnica Nacional.
- Comisión Nacional de Riego. (2020). *Manual de diseño de proyectos microhidroeléctricos en obras de riego*. Impresores S. A.
- Consortio Ecoforest Ltda. (2018). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá subcuenca Embalse Sisga*. Consortio Ecoforest Ltda.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR]. (2020). *Manual de operaciones del Embalse del Sisga*. CAR.
- Fundación Solar. (2018). *United Nations Development Programme. Centrales hidroeléctricas de pequeña escala, la experiencia de la Fundación Solar en Guatemala*. Fundación Solar. <https://www.undp.org/content/dam/guatemala/06%20Centrales%20Hidroel%c3%a9ctricas%20peque%3%b1a%20escala.pdf>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2011). *Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático: Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo III, Instituto de investigación sobre el impacto del clima Potsdam, 2011*. IPCC.
- Gugler Technology for Hydropower Plants (2020, diciembre 14). *Gugler Water Turbines GmbH*. <https://www.gugler.com/es/>
- Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas. (1997). *Guía para diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ministerio de Minas y Energía.
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L. (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: contexto y criterios. *Dyna*, 81(184), 178-185. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.39757>
- Organización Colparques. (2020, agosto 5). *Embalse del Sisga*. <http://www.colparques.net/SISGA>
- Organización de las Naciones Unidas Para el Desarrollo Industrial [ONUDI]. (2019). *Informe mundial sobre el desarrollo de la pequeña central hidroeléctrica*. ONUDI.
- Ortiz-Flórez, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ediciones de la U.
- Torres, E. (2010). Investigación en pequeñas centrales en Colombia. *Ingenio Libre*, 1(2), 1-15.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2020). *Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático*. UPME.
- United Nations Industrial Development Organization [UNIDO]. (2016). *World small hydropower development report*. UNIDO.
- Vélez-Álvarez, L. G. (2020). *Colombia: el futuro de las pequeñas centrales hidroeléctricas*. <https://panampost.com/luis-guillermo-velez/2020/02/17/colombia-centrales-hidroelectricas/>
- Yunus, C., & Cimballa, J. (2006). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana.

Gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá, Colombia

Management of Used Tires in Low Complexity Municipalities in the Central Province of the Department of Boyacá, Colombia

Andrea Angélica Bernal-Figueroa^{ac}, Zulma Edelmira Rocha-Gil^{ad},
Leidy Paola Buitrago-Ramírez^b

^a Grupo de Investigación Gestión Ambiental, Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Boyacá, Colombia.

^b Ingeniera ambiental | <https://orcid.org/0000-0002-5456-259X>

^c aabernal@uniboyaca.edu.co | <https://orcid.org/0000-0001-9024-5666>

^d <https://orcid.org/0000-0001-8331-4707>

RESUMEN

En Colombia las llantas usadas no son consideradas un residuo peligroso. Sin embargo, estas se componen de sustancias con dicha connotación, las cuales generan impactos negativos sobre la salud y el ambiente si no se realiza un manejo adecuado. Aunque en Colombia se han generado instrumentos normativos de sistemas de recolección selectiva, se tiene escaso conocimiento de aspectos relacionados con su gestión, generación y manejo; situación que se acrecienta en municipios de baja complejidad, donde a pesar de su generación no se realiza seguimiento

y la oferta de empresas de recolección o centros de acopio es limitada. Por ello, se realizó un estudio sobre la gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá, con el fin de indagar acerca de su generación, disposición y manejo, al igual que sobre el conocimiento de programas de recolección selectiva, aprovechamiento y cumplimiento de normatividad. Se aplicaron encuestas a establecimientos de 14 municipios de la provincia cuyas actividades comerciales estuvieran relacionadas con la distribución, el almacenamiento o el montaje de llantas. Se identificó desconocimiento del tema por parte de los administradores

Citation: Bernal-Figueroa, A. A., Rocha-Gil, Z. E. y Buitrago-Ramírez, L. P. (2021). Gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá, Colombia. *Mutis*, 11(2), 96-108. <https://doi.org/10.21789/22561498.1767>

Recibido: 8 de junio de 2021. **Aceptado:** 19 de julio de 2021.

Copyright: ©2021. Bernal-Figueroa, A. A., Rocha-Gil, Z. E. y Buitrago-Ramírez, L. P. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.



de los establecimientos evaluados y falta de acercamiento por parte de los proveedores de estos municipios. Aunque existen estrategias que permiten realizar un manejo adecuado de las llantas usadas, se hace necesaria la inclusión de los diferentes actores involucrados, así como el aumento de incentivos o beneficios para empresas que realicen este proceso de manera apropiada, o para quienes realicen actividades de reutilización, lo cual favorecería la gestión adecuada de este residuo.

Palabras clave: aprovechamiento, disposición, gestión de residuos, neumático de desecho, neumático fuera de uso.

ABSTRACT

In Colombia, used tires are not considered hazardous waste despite being composed of substances with this connotation, which generate negative impacts on health and the environment in case proper management is not performed. Although national regulatory instruments for selective collection systems have been generated, there is little knowledge of aspects related to their management, generation and handling; a situation that increases in low complexity municipalities where —despite its generation— adequate monitoring is not carried out and the supply of collection companies or collection centers is limited. Hence, a study on the management of used tires in low complexity municipalities of the Central Province of the department of Boyacá was carried out in order to inquire about their generation, disposal and management, as well as on the knowledge of selective collection programs, their use, and regulations compliance. Surveys were applied to establishments in 14 municipalities of the province whose commercial activities were related to tires distribution, storage or assembly. Lack of knowledge on the studied subject was identified in the administrators of the evaluated establishments, as well as a lack of rapprochement by tire suppliers of these municipalities. Although there are strategies that allow proper management of used tires, it is necessary to include the different actors involved and increase the incentives or benefits for companies that carry out this process properly, or for those who participate in reuse activities, which would favor the proper management of this type of waste.

Keywords: Recovery, disposal, waste management, waste tire, end of life tire.

INTRODUCCIÓN

Son consideradas llantas usadas aquellas de todos los diámetros que se encuentran en el mercado y que han dejado de ser útiles por haber perdido o disminuido las funciones principales para las cuales fueron diseñadas. De igual forma, se categorizan como estos residuos las llantas incompletas o pedazos de ellas que ya no son de utilidad, o que fueron reemplazadas por considerarse inseguras o de desecho (SEMARNAT, 2012). En la literatura referente al manejo o el aprovechamiento de este residuo, el término “llanta” se utiliza indistintamente de neumático. Para el presente estudio, se utilizará el primero, de acuerdo a lo establecido en la normatividad colombiana, la cual define llanta usada

como la que técnicamente ha finalizado su vida útil y es susceptible de reencauche o aprovechamiento (MADS, 2017).

Aunque en Colombia las llantas no son consideradas un residuo peligroso (MADS, 2021), estos productos están compuestos de un gran número de sustancias con connotaciones peligrosas, las cuales generan impactos negativos sobre la salud y el ambiente si no se realiza un manejo apropiado. Algunos de los principales impactos asociados a la generación de este residuo son la quema a cielo abierto, práctica que genera contaminantes atmosféricos como material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, entre otros (Casolco *et al.*, 2013).

Tales efectos se producen también en sistemas artesanales donde estos residuos se emplean como combustible alternativo, debido a que se trata de emisiones no controladas en ambientes con escasa ventilación y exposición continua, como el caso de las hornillas paneleras en la región Andina colombiana, donde la llanta resulta ser un energético atractivo debido a su bajo costo y alto poder calorífico; a pesar de que la exposición de las personas a este tipo de emisiones genera efectos crónicos en su salud (CCB & DAMA, 2006).

Adicionalmente, se conocen problemas como la generación de un aspecto visual negativo cuando son dispuestas de manera inadecuada, ya que por su volumen requieren amplios espacios de acopio (Casolco *et al.*, 2013), o que por su alto poder calorífico podrían generar un incendio difícil de controlar (ANDELLAC *et al.*, 2013). Debido a su estructura, estos residuos almacenan agua en su interior, lo que favorece la propagación de vectores y plagas nocivas que transmiten enfermedades como la fiebre amarilla o la encefalitis equina, que han generado un grave problema en muchos países, en especial por la propagación y eficiente dispersión de *Aedes albopictus*, importante vector transmisor del dengue (Casolco *et al.*, 2013; Rúa-Urbe *et al.*, 2012).

Es así como se evidencia la necesidad de implementar acciones tendientes a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención de la generación de estos residuos o la reducción de los posibles impactos adversos que pueda causar el manejo inadecuado de llantas usadas, por lo cual en Colombia se han propuesto algunos requisitos legales y normativos que promueven la ejecución de actividades dirigidas a minimizar la problemática causada por estos residuos, como la Resolución 1457 de 2010 (MAVDT, 2010), por la cual se establecieron los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas (SRS) para favorecer su reciclaje, aprovechamiento como agregado asfáltico y reencauche, o para evitar que sean quemadas en espacios a cielo abierto o usadas como combustible en actividades informales.

En consecuencia, el MADS avanzó en el fortalecimiento de dichos sistemas, considerando, entre otros aspectos, el aumento en la generación de

este residuo debido al crecimiento del parque automotor y la necesidad de involucrar otros tipos de llantas, como las de motocicletas, bicicletas y llantas fuera de carretera, producto de lo cual se generó la Resolución 1326 de 2017 (MADS, 2017), que establece la obligación de formular, presentar, implementar y mantener actualizados los SRS, a cargo de los productores de las llantas que se comercializan en el país, con el fin de prevenir y controlar la degradación del ambiente. Sin embargo, como mencionan Vélez y Echeverri (2016), la normatividad se ha quedado corta a la hora de establecer responsables y responsabilidades.

Por otra parte, la información en cuanto al manejo de llantas usadas a nivel regional es insuficiente. Los reportes de los últimos años han sido generados por la Corporación Autónoma Regional (Corpoboyacá), como autoridad ambiental en jurisdicción de la Provincia Centro, relacionando solo dos empresas debidamente registradas como gestores de llantas usadas, las cuales se encuentran ubicadas en el municipio de Duitama (Boyacá) (Corpoboyacá, 2018). Así mismo, el informe de gestión vigencia 2016 relaciona que en la ejecución del programa integral de residuos peligrosos se recolectaron 2.444 unidades de llantas desechadas a través de campañas de recolección (Corpoboyacá, 2016). Al respecto, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD, 2017) relaciona que Boyacá solo cuenta con dos estaciones de clasificación y aprovechamiento, ubicadas en los municipios de Tunja y Duitama, con una capacidad de almacenamiento de 154 y 40 toneladas, respectivamente, lo cual refleja una limitación en la oferta de servicios de recolección y almacenamiento temporal de llantas usadas, así como posibilidades de aprovechamiento.

En este contexto, se realizó un estudio sobre la gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá (Colombia) con el fin de indagar acerca de su generación, disposición y manejo, al igual que sobre el conocimiento de programas de recolección selectiva, aprovechamiento y cumplimiento de normatividad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a 14 municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá (Colombia), que a segundo semestre de 2016 registraban el transporte como una de las tres principales actividades económicas representativas en el Esquema de Ordenamiento Territorial: Cómbita, Cucaita, Chivatá, Chíquiza, Motavita, Oicatá, Samacá, Siachoque, Sora, Soracá, Sotaquirá, Toca, Ventaquemada y Tuta. Para el mismo período, estos municipios se encontraban categorizados por la Contaduría General de la Nación en nivel 6, de acuerdo con la Ley 1551 (Ley 1551 del Congreso de la República de Colombia, 2012), por presentar población menor a 10.000 habitantes e importancia económica grado 7, con ingresos corrientes de libre destinación anuales no superiores a 15.000 salarios mínimos legales mensuales, por lo cual son considerados de baja complejidad.

Recolección de datos

Teniendo en cuenta el enfoque de investigación descriptiva (Tamayo, 2004), se realizó la recolección de información primaria a través de la visita de 52 establecimientos ubicados en los municipios mencionados, los cuales fueron seleccionados teniendo en cuenta 2 criterios: actividad vigente para el año 2016 y actividad comercial relacionada con la distribución, almacenamiento o montaje de llantas en sus diferentes categorías. El municipio de Tunja, capital del departamento, que también forma parte de la Provincia Centro, no fue incluido por ser de alta complejidad, y sus resultados se presentan en el trabajo de Bernal-Figueroa *et al.* (2021). En cada establecimiento se aplicó una encuesta estructurada con aspectos asociados a la gestión de llantas usadas. Además, se realizó la consulta de fuentes secundarias de información relacionadas con la gestión de llantas usadas en el ámbito nacional e internacional.

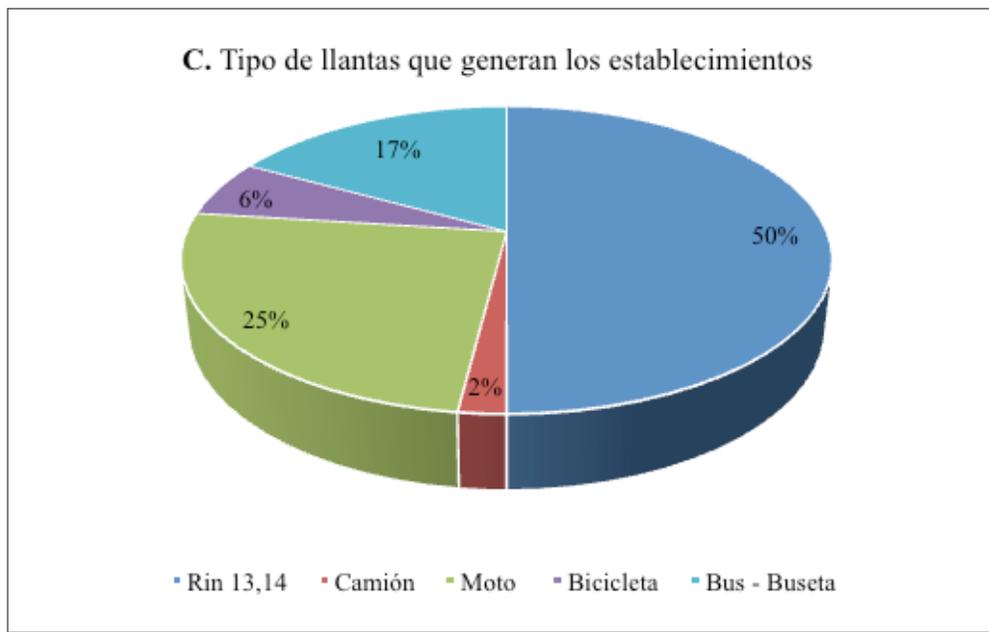
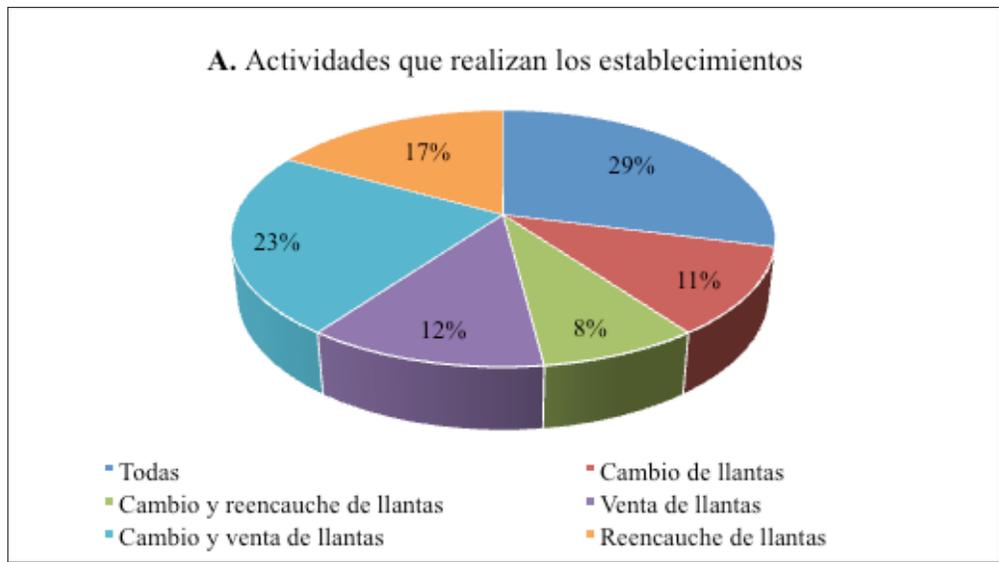
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con referencia a las actividades que realizan los establecimientos que generan llantas usadas en la

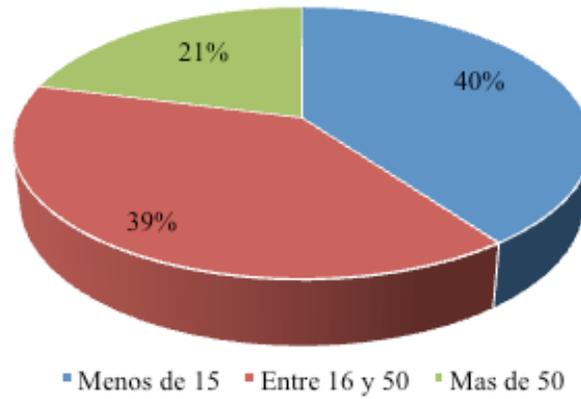
Provincia Centro del departamento de Boyacá, se encontró que 29 % de estos se dedican a actividades varias como el cambio, venta y reencauche de llantas, mientras que el porcentaje restante ejecuta algunas de estas actividades de forma separada (figura 1A). De igual forma, se identificó que los establecimientos no realizan un manejo adecuado a este residuo, considerando que los encuestados mencionan no haber recibido información o capacitaciones por parte de las autoridades ambientales, productores o comercializadores de llantas que les permitan realizar un manejo efectivo del residuo. Al respecto, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales de Colombia (ANLA, 2021) establece que los SRS formulados por los productores deberán especificar la cobertura inicial y las proyecciones se tendrán hasta lograr cubrir el 100 % de los municipios en donde se hayan comercializado los productos de los participantes del sistema. De igual forma, como refieren Taboada *et al.* (2013), las estrategias de las autoridades para el manejo de residuos deben ser acordes con las necesidades, la cultura y los recursos de las comunidades, así como con las características y volúmenes de los residuos generados.

De acuerdo con la información suministrada en cuanto a la generación de llantas usadas, se tiene que mensualmente el 40 % de los establecimientos evaluados indica generar menos de 15 unidades, 39 % entre 16 y 50 y 21 % más de 50 unidades (figura 1B), lo que da cuenta de una generación considerable de este residuo. Sin embargo, no se cuenta con datos públicos que permitan identificar la cantidad y el tipo de llantas usadas que se generan tanto en estos municipios como a nivel departamental. El informe de gestión 2016 de Corpoboyacá relaciona que se colectaron 2.444 unidades a través de campañas realizadas en la capital del departamento (Corpoboyacá, 2016), mientras que no se ha reportado su ejecución en los municipios considerados de baja complejidad, donde también se generan cantidades significativas. De igual forma, no se cuenta con información o indicadores exactos para establecer la cantidad y el tipo de llantas usadas dispuestas en sitios inadecuados (Fonseca & Mesa, 2017), lo que limita la identificación de posibilidades de aprovechamiento para las llantas generadas en estos municipios.

Figura 1. Resultados obtenidos de la aplicación de encuestas



B. Promedio de llantas usadas generadas mensualmente en los establecimientos



D. Disposición de llantas usadas



Fuente: elaboración propia.

Frente al tipo de llanta generada, el 50 % corresponde a llantas pequeñas de rines 13 y 14 (figura 1C), lo cual, de acuerdo con Espinoza *et al.* (2020), está relacionado con que estas son las utilizadas para automóviles; por ende, se evidencia su mayor generación. La problemática relacionada con la alta generación de este residuo no solo se evidencia en estos municipios, sino que este fenómeno registra un volumen creciente a nivel mundial (Acosta *et al.*, 2013; Casolco *et al.*, 2013; Mmereki *et al.*, 2019; Oboiriena & North 2017; Song *et al.*, 2018). Oboiriena y North (2017) mencionan que alrededor de 2.700 millones de unidades de neumáticos se produjeron en 2017, mientras que Acosta *et al.* (2013) indican que en Colombia la generación de residuos de llantas de automóvil, camioneta, camión y buseta se estimó en 61.000 t/año. Así mismo, Aragón y Espitia (2017) señalan que en Bogotá cerca de 2,5 millones de llantas cumplen su vida útil por año, por lo cual manejar adecuadamente estos desechos se ha convertido en un desafío (Song *et al.*, 2018), del que la zona centro del departamento de Boyacá no es ajena.

Acerca del almacenamiento, el 57 % de los establecimientos evaluados manifestó que no cuenta con un lugar específico para el acopio, mientras que el porcentaje restante indica que las almacena en lugares sin techos o sin paredes, lo que contribuye al estancamiento de aguas lluvias en su interior, así como a la alteración visual del paisaje, como se observa comúnmente. Córdova y Romo (2012) mencionan que en América Latina es habitual encontrar llantas usadas en la vía pública, en talleres mecánicos de automóviles, casas, cauces de arroyos y ríos, o la mayoría dispuestas en sitios ilegales. Además, en muchos casos se evidencia la quema abierta para la extracción del acero, creando un grave problema de contaminación ambiental (Acosta *et al.*, 2013; Marín, 2012).

De igual forma, Aragón y Espitia (2017) manifiestan que en la ciudad de Bogotá las llantas usadas terminan en calles, humedales, e incluso en espacios residenciales, representando un problema estético, sanitario y medioambiental. Por su parte, Mondelo *et al.* (2014) indican que el apilamiento es el método usado históricamente en numerosos países, tanto industrializados como en vía de desarrollo, lo cual fue evidenciado en los sitios visitados. Respecto al tiempo de permanencia en estos sitios de almacenamiento, el 80 % de los entrevistados manifiesta que

los residuos de este tipo permanecen aproximadamente de 1 a 2 meses allí, para posteriormente ser llevados a otros lugares para su disposición final, lo cual se configura en una práctica inadecuada, considerando las problemáticas ambientales relacionadas. Estos establecimientos no cuentan con la estructura física adecuada para el almacenamiento temporal ni con puntos de recolección permanentes o cercanos, motivo por el cual recurren a dicha práctica. Otro aspecto que es importante mencionar frente a su inadecuado almacenamiento es la proliferación de vectores de enfermedades. Frente a ello, Mondelo *et al.* (2014) manifiestan que la falta de control hace que estas llantas se conviertan en criaderos potenciales de vectores debido a que pueden convertirse en recipientes contenedores de agua y, por consiguiente, en criaderos de mosquitos.

Con respecto a su disposición final, el 29 % de los establecimientos indica que realiza su entrega a las empresas de servicios públicos y el 25 % las reusa, mientras que el 11 % comenta que los clientes las conserva (figura 1D). Sobre el tema, en Ciudad de Juárez (México), Córdova y Romo (2012) encontraron que casi el 40 % de las llantas de desecho se deposita en vulcanizadoras, cerca de la mitad en agencias y el porcentaje restante se almacena en casa como basura doméstica, o bien se arrojan a la vía pública, lo que representa un problema técnico, económico, ambiental y de salud pública (Córdova & Romo, 2012; Casolco *et al.*, 2013), por lo que las autoridades regionales han realizado campañas para su recolección. No obstante, como señalan Córdova y Romo (2012), esto no ha sido suficiente para resolver el problema, evidenciando la necesidad de buscar alternativas que incluyan al sector empresarial, la sociedad civil y la academia como parte de una sociedad consciente de buscar soluciones de manera coordinada.

En este sentido, el informe de Gestión de la Alcaldía Mayor de Tunja (2019) menciona que durante el período 2016-2019 se realizaron 6 jornadas de recolección de residuos especiales que permitieron coleccionar 4.726 unidades de llantas en esta ciudad. Sin embargo, no se hallaron datos públicos de procesos de recolección o cantidades para los municipios estudiados, lo cual evidencia la necesidad de realizar diagnósticos específicos en cuanto a la generación, a fin de identificar posibilidades de manejo y aprovechamiento para las zonas evaluadas.

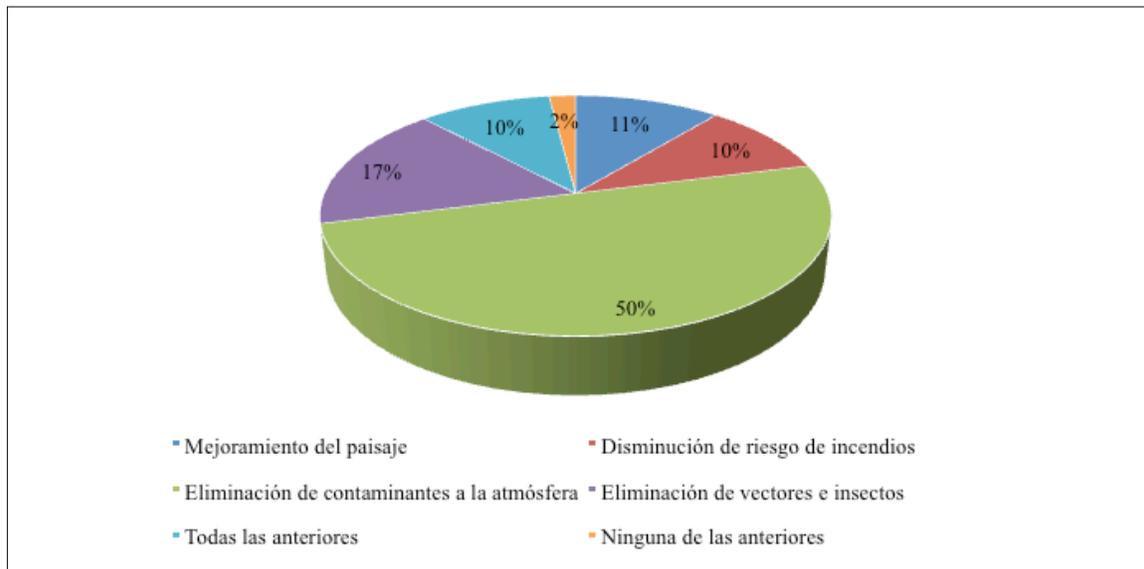
Por otra parte, se encontró que el 68 % de los establecimientos conocen alternativas de aprovechamiento de llantas usadas como el reencauche, la trituración mecánica y el uso asfáltico. Sin embargo, el 32 % restante desconoce las alternativas existentes. Al respecto, Chi y Tuyub (2015) mencionan que hace años la solución era botar estas llantas a la basura, las cuales eran llevadas a rellenos sanitarios para ser enterradas. No obstante, cuando se empezó a sensibilizar sobre temas ambientales, se encontró que estas son un desecho no biodegradable de larga vida. Córdova y Romo (2012) indican que para muchos usuarios lo más sencillo es conservar estos residuos en el patio trasero de sus hogares, mientras que otros los disponen en la vía pública y algunos más pagan por su disposición final (en México o Estados Unidos). A pesar de ello, estos autores resaltan que ninguna de estas opciones es una solución.

Otro de los grandes problemas identificados en la zona evaluada es el desconocimiento de puntos de recolección de este residuo, teniendo en cuenta que cerca del 94 % de los evaluados manifiesta no conocerlos. Este aspecto ya ha sido contemplado en países europeos, donde, de acuerdo con Díaz *et al.* (2004), se generan incentivos a partir de una gran cantidad de puntos de recolección en las ciudades, que son posibles por una regulación exigente en términos de

recolección y demanda de la sociedad por la implementación de medidas que contribuyan a proteger el ambiente y a depender menos de los vertederos para gestionar sus residuos. Garzón y Hernández (2014) señalan que el establecimiento de puntos de recolección se hace atractivo para gestores públicos o privados, pero también permitiría a los ciudadanos conocer la red y usarla de manera intensiva e intuitiva, generando conciencia social sobre su existencia y sobre los asuntos ambientales.

De otro lado, al indagar si los entrevistados consideran que el reciclaje de llantas contribuye al cuidado del medio ambiente, el 98 % sostuvo que sí. De estos, 50 % cree que ayuda a la eliminación de contaminantes emitidos a la atmósfera al evitar su quema, 17 % porque se eliminan vectores e insectos y un 11 % porque mejora el paisaje y disminuye el riesgo de incendios (figura 2). Frente a la percepción acerca del aprovechamiento de las llantas usadas, el 77 % señala que es una buena alternativa para disminuir el impacto ambiental y un 19 % lo considera como una oportunidad de negocio. Sin embargo, también manifiestan desconocer el tema, y resaltan que es importante brindar información a los propietarios de los establecimientos y consumidores sobre las diferentes alternativas existentes.

Figura 2. Percepción de los establecimientos frente a la contribución del reciclaje de llantas usadas al cuidado del medio ambiente



Fuente: elaboración propia.

Actualmente existen múltiples investigaciones acerca de las alternativas de aprovechamiento de llantas usadas una vez han sido colectadas (Blanco *et al.*, 2017; Mmereki *et al.*, 2019; Oboiriena & North 2017; Ospina & Villada, 2011; Peláez *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2018). En estudios nacionales, Peláez *et al.* (2017) presentan una revisión de las aplicaciones de caucho reciclado, centrándose en alternativas viables para medianas y pequeñas empresas, concluyendo que uno de los principales campos potenciales es utilizar este material como modificador de pavimentos y concretos, así como la posibilidad de usarlo en sistemas de adsorción de contaminantes en medios acuosos, techos ecológicos y la fabricación de celdas de combustible para la generación de energía. Ospina y Villada (2011) revisan los métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso, señalando que en Europa, Asia y Norteamérica se cuenta con desarrollos tecnológicos para la optimización y el aprovechamiento de este residuo, mientras que en Colombia es aprovechable principalmente para la fabricación de suelas de zapatos, canchas sintéticas y pavimentación. Por su parte, Marín (2012) indica que las llantas usadas pueden ser empleadas para la producción de carbón activado de buena calidad, utilizado para la remoción de contaminantes en el agua, mientras que Miranda *et al.* (2006) exponen que estos residuos son una buena alternativa para la generación de energía debido a su alto poder calorífico.

Miranda *et al.* (2006) encontraron que el uso de una membrana absorbente en los neumáticos desechables resultó ser un método eficaz de drenaje de agua, contribuyendo a evitar posibles criaderos de *A. aegypti*. Además, Acosta *et al.* (2013) indican que la pirólisis se ha planteado como uno de los procesos tecnológicos apropiados para su aprovechamiento y valorización. Por otra parte, Mondelo *et al.* (2014) manifiestan que este tipo de residuos pueden utilizarse para regeneración de caucho, generación de energía o fabricación de nuevos materiales.

En el contexto internacional se identifica un importante número de estudios relacionados con el reciclaje y aprovechamiento de este residuo. Mohajerani *et al.* (2020) realizaron en Australia una investigación tendiente a utilizar la goma de llantas usadas como un componente del hormigón para reemplazar el uso de arena, mejorando con ello la ductilidad y resistencia del hormigón y haciendo posible su uso en

la ingeniería geotécnica para el control de movimientos de tierra. Bowles *et al.* (2020) indican que dependiendo del tamaño de la goma se puede adicionar 5 % del caucho reciclado para la elaboración de una llanta nueva. Kaliyappan *et al.* (2020) destacan que es posible desarrollar un compuesto híbrido de caucho natural-neopreno utilizando diferentes rellenos de residuos de caucho y carbón, incluyendo un efecto de variación de negro de humo sobre la morfología y las propiedades mecánicas del compuesto fabricado.

Arabiourrutia *et al.* (2020), en España, buscaron determinar cómo se puede hacer la valorización de neumáticos mediante pirólisis catalítica, demostrando que mediante esta técnica se pueden obtener subproductos de la llanta como gases, aceite y carbón. Mavukwana *et al.* (2020) estudiaron en Sur África la forma en que estos residuos se pueden convertir en electricidad basados en análisis de termodinámica. Ma *et al.* (2020) proponen en China el uso de partículas de goma de llantas usadas para la preparación de compuestos de cemento de fosfato y magnesio, los cuales son usados en ingeniería de carreteras y puentes. Además, Thai *et al.* (2020) estudiaron la conversión de fibras de caucho de residuos de neumáticos en aerogeles. Lo anterior por destacar algunos de los múltiples estudios que se han realizado para fomentar el aprovechamiento de este residuo en el contexto nacional y mundial, avances que podrían ser investigados para su aplicación en Colombia. No obstante, de acuerdo con Sebola *et al.* (2018), aunque las tecnologías e innovaciones para recuperar llantas al final de su vida útil están bien establecidas, el reciclaje de llantas de desecho no tiene éxito a nivel mundial.

Por último, es importante resaltar que el 92 % de los establecimientos encuestados manifiestan no haber recibido alguna capacitación u obtenido información por parte de los proveedores, por lo cual es importante que se realicen acercamientos con estos pequeños municipios, de tal forma que los propietarios y trabajadores de los establecimientos puedan conocer cómo se debe realizar adecuadamente su disposición final, una vez las llantas hayan perdido su utilidad. De igual forma, el 54 % de los establecimientos evaluados manifestó no contar con un plan de contingencia, por lo que resulta importante motivarlos a contar con planes que incluyan medidas de prevención y atención de emergencias que puedan generarse por el inadecuado almacenamiento de este residuo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se identificó como mayor problema el desconocimiento de la gestión adecuada para el manejo de llantas usadas por parte de los administradores de los establecimientos evaluados, hecho que dificulta que las acciones contempladas por los entes gubernamentales sean implementadas eficientemente. Así mismo, se evidenció la falta de acercamiento de los proveedores de llantas a los establecimientos de estos municipios dedicados a su comercialización.

Aunque existen estrategias que permiten realizar un manejo adecuado de las llantas usadas, se hace necesaria la inclusión de los diferentes actores involucrados, así como el aumento de incentivos o beneficios para las empresas que realicen este proceso de manera apropiada, o para quienes realicen actividades de reutilización, con lo cual se favorecería una gestión adecuada de este residuo tanto en el contexto regional como nacional.

El aprovechamiento de llantas usadas es un campo por explorar, teniendo en cuenta que es posible recuperar los materiales que las componen y darles nuevos usos. Para ello, se requiere incrementar la investigación en el área, de tal forma que se promueva el desarrollo de proyectos ambientales sostenibles con estrategias de innovación, como ya ha sido desarrollado ampliamente en el contexto internacional.

Se evidencia además la necesidad de realizar estudios de caracterización de las llantas usadas que se generan en la Provincia Centro con el fin de analizar alternativas para su aprovechamiento y potenciales estrategias de manejo. Igualmente, se deben llevar a cabo estudios de viabilidad sobre costos ambientales asociados a la recolección, almacenamiento y entrega a gestores, o posibilidades de implementar desarrollos tecnológicos como su uso energético o la fabricación de nuevos materiales, entre otras alternativas ya disponibles en el país.

Finalmente, al indagar sobre aspectos relacionados con la generación, recolección, manejo, aprovechamiento y conocimiento de la normativa aplicable a este sector, se identifica la necesidad de trabajo articulado entre actores involucrados en la gestión de llantas usadas a nivel nacional y regional, puesto que aunque se cuenta con una normativa vigente para la recolección selectiva y la gestión de llantas usadas,

esta no se articula con las necesidades identificadas en los pequeños municipios analizados ni incluye compromisos puntuales para prevenir y controlar la degradación del medioambiente. Lo anterior, considerando estrategias de trabajo conjunto entre productores o importadores, gestores, consumidores, autoridades municipales y distritales y autoridades ambientales, para que desde la fuente se fomente la reutilización sostenible de este tipo de residuos. De igual forma, es importante el trabajo conjunto a nivel de provincia encaminado a identificar estrategias técnicas, administrativas y políticas que permitan cumplir con lo dispuesto en la Resolución 1326 de 2017 en cuanto a los sistemas de recolección selectiva y la gestión ambiental de llantas usadas para esta región.

REFERENCIAS

- Acosta, R., Moncada, S., Gauthier-Maradei, P., & Nabarlatz, A. (2013). Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 24(1), 139-145.
- Alcaldía Mayor de Tunja. (2019). *Informe acta de gestión "Tunja en Equipo" 2016-2019*. Alcaldía Mayor de Tunja. https://alcaldiatunja.micolombiadigital.gov.co/sites/alcaldiatunja/content/files/000713/35645_2019_29dic_informe_final_gestion_2016_2019_tunja_en_equipo.pdf
- Arabiourrutia, M., López, G., Artetxe, M., Álvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2020). Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932>
- Aragón, J., & Espitia, J. (2017). Evaluación térmica de la sustitución del material de la capa de drenaje en techos verdes por llantas usadas - análisis experimental en el II periodo húmedo climático del 2016, Bogotá. *Avances Investigación en Ingeniería*, 14(1), 21-36.
- Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras A. C. [ANDELLAC], Asociación Nacional de Importadores de Llantas

- A. C. [ANILLAC], & Cámara Nacional de la Industria Hulera [CNIH]. (2013). *Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho. Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011*. ANDELLAC, ANILLAC, & CNIH. <http://reciclallantas.org.mx/wp-content/uploads/2016/02/Plan-de-Manejo-de-Neumaticos-Usados-de-Desecho-2015-.pdf>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales de Colombia [ANLA]. (2021). *Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos – Llantas Usadas*. ANLA. <http://portal.anla.gov.co/sistema-recoleccion-selectiva-y-gestion-ambiental-residuos-srs-llantas-usadas>
- Bernal-Figueroa, A., Rocha-Gil, Z., Medina-Moreno, J., Casas-Martínez, Y., & Buitrago-Ramírez, L. (2021). Gestión de llantas usadas en la ciudad de Tunja, Boyacá (Colombia). *Rev. U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), e1627. <http://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1627>
- Blanco, E., Travieso, D., & Andrade, J. (2017). Energetic valorization of waste tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 306-315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.110>
- Bowles, A., Fowler, G., O’Sullivan, C., & Parker, K. (2020). Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis. *Sustainable Materials and Technologies*, 25, e00173. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00173>
- Casolco, S., Guerra, A., Horteiga, R., Castillo, S., & Bolaños, J. (2013). Llantas: Situación actual y oportunidades locales para la ingeniería civil en Puebla, México. *Vislumbra, Revista de Divulgación del Tecnológico de Monterrey*, 1(2), 63-74.
- Chi, M., & Tuyub, J. (2015). Análisis de las propiedades físicas y eléctricas en compuestos a base de emulsiones asfálticas con elastómeros y partículas conductoras. *Ingeniería*, 19(3), 157-167.
- Congreso de la República de Colombia. (2012, julio 6). Ley 1551. *Por la cual se dictan normas para modernizar la organización y el funcionamiento de los municipios*. Diario Oficial N.º 48483.
- Córdova, G., & Romo, M. (2012). Gestión pública para solucionar un problema ambiental: manejo de llantas de desecho en Ciudad Juárez. *Región y Sociedad*, 24(53), 119-151.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá [Corpoboyacá]. (2016). *Informe de gestión Vigencia 2016*. Corpoboyacá. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2016/01/informe-de-gestion-2016-v2.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá [Corpoboyacá]. (2018). *Listado de gestores de llantas usadas en jurisdicción de Corpoboyacá*. Corpoboyacá. <https://www.corpoboyaca.gov.co/tramites-y-servicios/gestion-integral-de-residuos-especiales/gestion-de-llantas-usadas/>
- Díaz, A., Álvarez, M., & González, P. (2004). *Logística inversa y medio ambiente*. McGraw-Hill.
- Espinoza, L., Fariño, J., Patricio, Y., & Mayorga, M. (2020). Responsabilidad social y ambiental: Tratamiento y disposición final de llantas usadas en la Ciudad de Machala. *Gestión en el Tercer Milenio*, 23(45), 39-48. <http://dx.doi.org/10.15381/gtm.v23i45.17405>
- Fonseca, M., & Mesa, C. (2017). Modelo logístico de recolección de llantas para la ciudad de Tunja. *Revista Vínculos*, 14(2), 108-118. <https://doi.org/10.14483/2322939X.13196>
- Garzón, M., & Hernández, D. (2014). *Logística inversa en ciudades, las redes de recolección de artículos en pos-consumo*. Twelfth Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014). Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity. Guayaquil, Ecuador.
- Kaliyappan, P., Dhananchezian, M., & Rajkumar K (2020). Utilization of waste tyre rubber and carbon black to develop a neoprene rubber hybrid composite. *Materials today: Proceedings*, 27(2), 724-728. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.307>
- Ma, C., Zhao, B., He, Y., Li, F., Long, G., & Du, Y. (2020). Preparation and properties of sustainable magnesium phosphate cement composites with recycled tire rubber particles. *Journal of*

- Cleaner Production*, 262, 121253. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121253>
- Marín, B. (2012). En favor del medio ambiente: de llantas vieja a carbón activado. *Revista Universitas Científica*, junio, 32-35.
- Mavukwana, A., Fox, J., & Sempuga, B. (2020). Waste tyre to electricity: thermodynamics analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103831. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103831>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [MADS]. (2017). *Resolución 1326 de 2017. Por la cual se establecen los sistemas de Recolección selectiva y Gestión Ambiental de Llantas usadas y se dictan otras disposiciones*. MADS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [MADS]. (2021). *Llantas usadas*. MADS. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/programas-posconsumo-existent/llantas-usadas#:~:text=Las%20llantas%20usadas%20no%20son,y%20como%20combustible%20en%20actividades>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia [MAVDT]. (2010). *Resolución 1457 de 2010. Por la cual se establecen los sistemas de Recolección selectiva y Gestión Ambiental de Llantas usadas y se dictan otras disposiciones*. MAVDT.
- Miranda, R., Segovia, C., & Sosa, C. (2006). Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético. *Ingenierías*, 9(32), 8-16.
- Mmereki, D., Machola, B., & Mkokwe, K. (2019). Status of waste tires and management practice in Botswana. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(10), 1230-1246. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1279696>
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- Mondelo, R., Fabricio, E., Gauto, N., & Hernández, N. (2014). Uso de membrana de drenaje para evitar acumulación de agua y posibles criaderos de *Aedes aegypti* (Linnaeus 1762) (Diptera: Culicidae) en neumáticos desechables. *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 66(2), 210-218.
- Oboiriena, B., & North, B. (2017). A review of waste tyre gasification. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 5169-5178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.057>
- Ospina, J., & Villada, S. (2011). Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso a través de las normas ASTM. *Lámpsakos*, 3(6), 23-31. <https://doi.org/10.21501/21454086.830>
- Peláez, G., Velásquez, S., & Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143>
- Rúa-Uribe, G., Suárez-Acosta, C., & Rojo, R. (2012). Implicaciones epidemiológicas de *Aedes albopictus* (Skuse) en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 30(3), 328-337.
- Sebola, M., Mativenga, P., & Pretorius, J. (2018). A benchmark study of waste tyre recycling in South Africa to European Union *Practice*. *Procedia CIRP*, 69, 950-955. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.137>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2012). *Guía para el establecimiento de un centro de acopio de llantas de desecho*. SEMARNAT. <https://www.sema.gob.mx/VENTANILLA/SGA/030%20GUIA%20CENTRO%20DE%20ACOPIO%20LLANTAS.pdf>
- Song, P., Zhao, X., Cheng, X., Li, S., & Wang, S. (2018). Recycling the nanostructured carbon from waste tires. *Composites Communications*, 7, 12-15. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2017.12.001>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios de Colombia [SSPD]. (2017). *Informe Nacional de Aprovechamiento 2016*. SSPD. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Noticia/Noticias%20de%20interes/2018/Sep/187302.pdf>
- Taboada, P., González, Q., Aguilar, V., Cruz, S., & Ramírez, S. (2013). Manejo y potencial de recuperación de residuos sólidos en una comunidad rural de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 43-48.
- Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica* (4ª ed.). Limusa.
- Thai, Q., Chong, R., Nguyen, P., Le, D., Le, P., Phan-Thien, N., & Duong, H. (2020). Recycling of waste tire fibers into advanced aerogels for thermal insulation and sound absorption applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104279. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104279>
- Vélez, D., & Echeverri, J. (2016). Caracterización de la generación de neumáticos y manejo de sus desechos en el departamento del Quindío. *Revista Aletheia*, 6, 31-47.

Aporte del SENA al Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia

The Contribution of SENA to Colombian Science, Technology, and Innovation System

Gustavo Vargas Yara^{ac}, Darwin Dubay Rodríguez^{ad}, Aylin Viviana Silva Ortiz^{be}

^a Grupo de Investigación del Centro Metalmecánico (GICEMET), Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia

^b Asesora Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia

^c gvargas@sena.edu.co | <https://orcid.org/0000-0003-4733-2136>

^d drodriguezp@sena.edu.co | <https://orcid.org/0000-0003-1172-1295>

^e avsilva@sena.edu.co | <https://orcid.org/0000-0001-6610-5188>

RESUMEN

Existen diferentes enfoques que dan cuenta de la importancia de la relación entre el crecimiento económico y la implementación de programas de ciencia, tecnología e innovación (CTI) en el marco del diseño, la ejecución y la evaluación de políticas públicas. Por lo anterior, este trabajo aborda dicha relación desde el concepto, la metodología, la normativa y la implementación de la política de CTI de Colombia, resaltando el aporte del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) a la construcción de programas de CTI en el país. Aquí se muestran las contribuciones de la estrategia SENNOVA, creada por el SENA, como respuesta institucional a la normatividad de ciencia y tecnología nacional y la organización en la inversión de recursos. Finalmente, se concluye que SENNOVA es un agente multiplicador de la apropiación tecnológica, social y colectiva, al transferir el conocimiento generado en los proyectos de diferentes líneas programáticas de CTI a los procesos de formación profesional y al sector productivo, contribuyendo así con la disminución de las brechas tecnológicas existentes en el país.

Citation: Varas-Yara, G., Rodríguez, D. D. y Silva-Ortiz, A. V. (2021). Aporte del SENA al sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación de Colombia. *Mutis*, 11(2), 109-131. <https://doi.org/10.21789/22561498.1723>

Recibido: 23 de febrero de 2021. **Aceptado:** 30 de abril de 2021.

Copyright: ©2021. Varas-Yara, G., Rodríguez, D. D. y Silva-Ortiz, A. V. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Palabras clave: SENNOVA, SENA, ciencia, tecnología, innovación.

ABSTRACT

Different approaches remark the importance of the relationship between economic growth and the implementation of science, technology, and innovation programs within the design and evaluation of public

policies. Therefore, this paper addresses said relationship from the concept, methodology, regulations, and implementation process of Colombian policy regarding science, technology, and innovation, highlighting the contribution made by the National Apprenticeship Service (SENA) to the development of related programs. The contributions made by the SENNOVA strategy, created by SENA, as an institutional response to national regulations on science and technology and the allocation of resources are also reported in this work. We concluded that SENNOVA is a multiplying agent of technological, social, and collective appropriation given its role in transferring the knowledge generated in the projects from different programmatic lines of science, technology, and innovation to professional training and the productive sector, thus contributing to the reduction of technological gaps in the country.

Keywords: SENNOVA, SENA, science, technology, innovation.

INTRODUCCIÓN

La creación de políticas públicas para fomentar la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI) como actores importantes del desarrollo productivo de una nación se encuentra determinada por agentes externos que muchas veces están influenciados por el tipo de régimen político. Este es el caso de Ghana, economía emergente de África, donde desde 1957 hasta 2012 se identifican cambios en la política de CTI y los efectos de esta según el régimen político de turno, como muestra Amankwah-Amoah (2016). En países más desarrollados se siguen estructuras de política pública basadas en instrumentos que permiten su rápida y eficaz implementación, así como la pronta modificación de dicha política en caso de que esta no funcione. Generalmente, en estas naciones se guarda una total coherencia entre los objetivos de desarrollo establecidos en la política general del país y la planificación, distribución de recursos, prospectiva de ciencia y tecnología, y los instrumentos para tal fin, haciendo un riguroso seguimiento y control a los resultados, con un menor efecto generado por el régimen de turno (Peijie & Li, 2021). En países vecinos, como Ecuador, por ejemplo, se analizan dos programas de I+D relacionados con la contratación pública y el fomento a la innovación, evidenciado que ninguno de estos instrumentos produce un efecto significativo en la decisión de las empresas de invertir en I+D (Fernández-Sastre & Montalvo-Quizhpi, 2019).

Los efectos de la pandemia de COVID-19 dejaron ver ejemplos de negación y politización de la ciencia, al tiempo que desencadenaron el compromiso de los científicos frente a la producción de información con el objetivo de ayudar a los responsables políticos ante la problemática actual, cuyo impacto en países emergentes es más notorio, como indican Pardini *et*

al. (2021). Con ello, se evidencia que el éxito de los programas e instrumentos de política pública no solo depende de la estabilidad política, sino también de recursos, planeación, evaluación y el correcto seguimiento a su implementación.

En el caso colombiano, a partir de la década de los noventa del siglo pasado, con la promulgación de la Ley 29 de 1990, se ha observado la preocupación por fomentar acciones que contribuyan al desarrollo de CTI, las cuales van desde el establecimiento de directrices, planes o estrategias —tales como, la transformación de Colciencias en el Departamento Administrativo, buscando fortalecer el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación— hasta la reciente decisión de crear un ministerio (Minciencias), por medio del cual Colciencias se convierte en el ente rector de la política de CTI nacional, cuyo objetivo es generar capacidades que promuevan el conocimiento científico y tecnológico, además de contribuir al desarrollo y el crecimiento del país (Ley 1951 de 2019). Así mismo, los planes de desarrollo planteados por el Gobierno Nacional han incorporado algunos lineamientos de política pública que señalan un relativo interés en esta materia, a pesar de que la inversión de recursos públicos y privados para ello aún se encuentra lejos de estándares internacionales, incluyendo a los países de la región. En este sentido, el documento de Plan Nacional de Desarrollo del país 2018-2022 (DNP, 2019a) plantea ejes o pactos estructurales (así como otros denominados transversales) dentro de los cuales se encuentra el de CTI. Por su parte, el Pacto por el emprendimiento, la formalización y la productividad, incluido en esta política, contempla entre sus estrategias a la transformación empresarial, el desarrollo productivo, la innovación y la adopción tecnológica para la productividad (DNP, 2019a, p. 120).

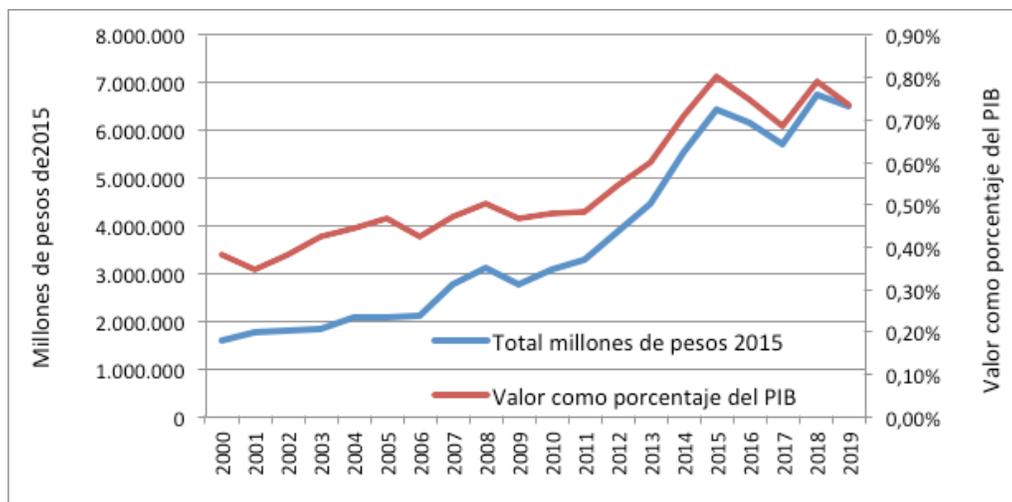
En concordancia con lo anterior, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 contempla estrategias para fortalecer la institucionalidad, incrementar la productividad empresarial y mejorar la oferta de bienes públicos, con el fin de sofisticar el desarrollo productivo, incrementar apoyos a empresas para una modernización productiva y fortalecer la promoción de la investigación, el desarrollo y la innovación empresarial. En el marco de la política de desarrollo productivo, el documento Conpes 3866 de 2016 define el conjunto de instrumentos sectoriales y transversales para resolver las fallas de mercado, de gobierno y de articulación que inhiben el crecimiento de la productividad o que dificultan los procesos de sofisticación del aparato productivo nacional. Así, este documento propone como solución, entre otras, mejorar la capacidad de las unidades productoras para innovar y emprender, con lo cual se busca absorber y transferir conocimiento y tecnología en articulación con los actores del Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTI). De manera particular, como un componente que retroalimenta las acciones de formación profesional, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) tradicionalmente ha llevado a cabo programas de innovación y desarrollo tecnológico, especialmente aquellos diseñados a partir de la expedición de la Ley 344 de 1996 (artículo 16).

Teniendo en cuenta que uno de los propósitos de las acciones señaladas es mejorar el bienestar general de la sociedad, las mediciones permiten poner en contexto el estado de las mismas, así como el balance

entre el esfuerzo realizado y los resultados obtenidos. En este sentido, a nivel total de la economía, de acuerdo con cifras del Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, en las últimas dos décadas la financiación de actividades de ciencia tecnología e innovación (ACTI) en términos reales registró una tendencia creciente (figura 1), pasando de COP 1,06 billones en 2000 a 6,5 billones en 2019 (valores constantes de 2015). Como porcentaje del producto interno bruto (PIB), se observa un crecimiento más marcado entre 2012 y 2015, explicado principalmente por los recursos provenientes del sistema de regalías, siendo el pico más alto en 2015, cuando la inversión en este rubro representó 0,8 % del PIB del país, seguido por una reducción en el ritmo de crecimiento hasta situarse en 0,74 % en 2018. Sin embargo, a pesar de este crecimiento, la inversión en ACTI aún se encuentra lejos del 1,5 % propuesto como meta para 2022 en el actual Plan Nacional de Desarrollo.

Frente al total de la inversión, en años recientes se observa una participación casi proporcional en la financiación de ACTI proveniente de recursos públicos y privados, hasta situarse en 2019 en 48 y 49 %, respectivamente, seguida de un 3 % de recursos de origen internacional. En contraste con lo observado, de acuerdo con Zerda (2003), en los años noventa el mayor esfuerzo en la inversión en ciencia y tecnología correspondió de al sector público, debido principalmente a los créditos contratados con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Figura 1. Financiación de actividades ACTI en Colombia (2000-2019)



Fuente: Observatorio de Ciencia y Tecnología (2020).

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, y considerando la importancia de las ACTI, este documento tiene como propósitos (i) realizar un balance de los desarrollos en materia de política pública en Colombia y algunos referentes internacionales, (ii) presentar un balance de las acciones que ha adelantado el SENA en esta materia y la incidencia de ellas sobre la formación profesional, y (iii) plantear algunos elementos que sirvan para la toma de decisiones por parte de esta entidad. Teniendo en cuenta que, hasta donde sabemos, no se han realizado estudios particulares frente a inversión y resultados en acciones de investigación e innovación desde la formación para el trabajo, el presente estudio busca abordar esta temática mediante el empleo de fuentes primarias y secundarias, con el propósito de proporcionar nuevos referentes para el diseño de política pública.

El documento está organizado en cuatro secciones, siendo esta introducción la primera de ellas. A continuación, se presentan los aspectos metodológicos del trabajo. Posteriormente, se abordan los antecedentes teóricos y de política pública en torno a la

innovación. En la tercera sección se reseñan elementos normativos y prácticos del diseño, ejecución y evaluación de la política nacional, particularmente en el SENA. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas tras la realización de esta investigación.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

El Observatorio de Ciencia, Tecnología e Innovación (OCyT) y el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación adoptaron una metodología de medición de ACTI con base en los conceptos, términos y clasificaciones de referentes internacionales, así como la revisión de metodologías empleadas en el país (OCyT, 2008). En este sentido, se define a las actividades científicas y tecnológicas como aquellas que están estrechamente relacionadas con la producción, promoción, difusión y aplicación de los conocimientos científicos y técnicos en todos los campos de la ciencia y la tecnología. La tabla 1 resume los principales conceptos asociados.

Tabla 1. Clasificación de conceptos generales sobre ACTI

Categoría	Descripción	Desagregación
Investigación y Desarrollo Experimental (I+D)	Comprenden el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos humanos, culturales y sociales y el uso de estos para derivar nuevas aplicaciones.	
Otras ACTI	Comprenden la enseñanza y la formación científica y técnica y los servicios científicos y técnicos. Estos últimos incluyen, por ejemplo, actividades de ciencia y tecnología, el control y la prospectiva, la recogida de datos sobre fenómenos socioeconómicos, los ensayos, la normalización y el control de calidad, el asesoramiento a clientes y servicios, y las actividades relacionadas con patentes y licencias a cargo de las administraciones públicas.	Apoyo a la formación y capacitación científica y tecnológica: incluye los gastos en educación formal a nivel de maestría y doctorado y la formación permanente de científicos e ingenieros (postdoctorados y cursos de entrenamiento especializados).
		Servicios científicos y tecnológicos: engloba las actividades relacionadas con la investigación y el desarrollo experimental que contribuyen a la producción, difusión y aplicación de conocimientos científicos y técnicos.
Administración y otras actividades de apoyo	Apoyan las actividades de I+D adelantadas por entidades como ministerios, organismos de investigación, fundaciones y otros organismos sin ánimo de lucro mediante la recolección, administración y distribución de fondos entre los ejecutores.	

Categoría	Descripción	Desagregación
Actividades de innovación	<p>Todas aquellas etapas científicas, técnicas, comerciales y financieras que a pesar de no ser I+D resultan necesarias para la puesta en marcha de productos o servicios nuevos o mejorados y la explotación comercial de procesos nuevos o mejorados.</p> <p>Esta categoría incluye la adquisición de tecnología (incorporada y no incorporada), el utilaje y la ingeniería industrial, el diseño industrial, otras adquisiciones de capital, el arranque del proceso de fabricación y la comercialización de nuevos productos.</p>	Diseño, instalación de maquinarias nuevas, ingeniería industrial y puesta en marcha de la producción.
		Adquisición de maquinaria y equipos con desempeño tecnológico mejorado (incluso software integrado) vinculados con las innovaciones implementadas por la empresa.
		Adquisición de tecnología no incorporada al capital, tales como patentes, inventos no patentados, licencias, divulgaciones de <i>know-how</i> , diseños, marcas de fábrica y patrones, así como de servicios de computación y otros servicios científicos y técnicos relacionados con la implementación de innovaciones tecnológicas en productos y procesos, además de la adquisición de paquetes de software.
		Modernización organizacional conducente a la introducción de cambios en el proceso productivo tendientes a reducir tiempos muertos, desechos, tiempos de proceso u otros similares, todo ello con la línea de producción existente. Modificaciones en el dibujo o diseño de la línea de producción (con las mismas máquinas y equipos existentes), mejoras en la organización física de la planta y desverticalización del proceso productivo, entre otros.
		Actividades relacionadas con el lanzamiento de productos tecnológicamente nuevos o mejorados; entre ellas se incluyen la investigación preliminar de mercado y la publicidad de lanzamiento.
		Capacitación en temas estrechamente relacionados con las tecnologías centrales en el proceso productivo del establecimiento. Pueden ser blandas (gestión y administración) o duras (tecnología de procesos productivos), e involucran un grado de complejidad significativo (no evidente) que requiere de un personal capacitador altamente especializado.

Fuente: elaboración propia con base en información del OCyT (2008).

Con base en esta clasificación se pretende identificar en qué medida las acciones realizadas por el SENA en materia de investigación, desarrollo tecnológico e innovación pueden ser consideradas como tal, cómo se ha dado su desarrollo en el tiempo, cuál ha sido el aporte de tales acciones, y si estas se encuentran alineadas con los desarrollos y las tendencias en materia de política pública.

ASPECTOS CONCEPTUALES Y DE POLÍTICA PÚBLICA EN MATERIA DE CTI

Crecimiento económico y cambio técnico

En la visión convencional de las teorías de crecimiento económico, el proceso de acumulación de capital físico

y humano determina las diferencias de productividad entre países, siendo el cambio en la tecnología (entendido como el logro más eficiente de la combinación de factores de producción para la obtención del producto) el único factor que explica las modificaciones en las tasas de crecimiento. Si bien se han presentado divergencias y discusiones en torno a aspectos como el papel del ahorro, la inversión o la caracterización de un agente representativo, en general, se mantiene el cambio tecnológico como factor fundamental del crecimiento económico de las naciones. Esta visión hace referencia a los modelos de Solow, Romer, Aghion y Howitt, planteados y revisados en la segunda mitad del siglo XX. A juicio de Hernández (2004), la principal debilidad de estas concepciones es el empleo de funciones de producción representativas, lo cual desconoce las implicaciones teóricas y de política existentes en las diferentes instituciones y organizaciones.

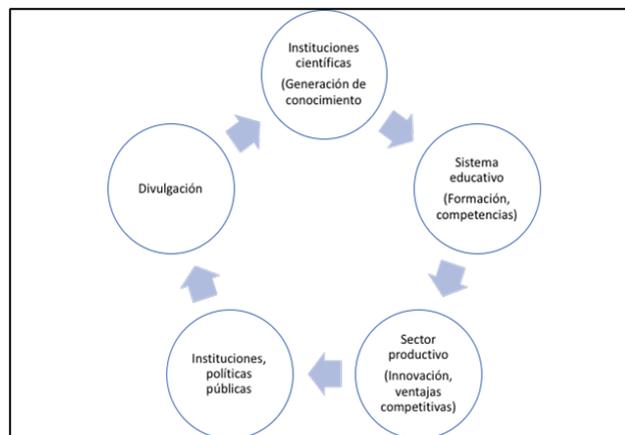
Una segunda vertiente de pensamiento se ha concentrado en indagar por las formas específicas en que se genera el cambio técnico y cómo este se difunde, o cómo se producen procesos de interacción entre los diferentes agentes. Frente a ello, Schumpeter introduce el concepto de “destrucción creadora” al considerar que los motores del desarrollo económico (concepto más amplio que crecimiento económico) son la tecnológica y las fuerzas socioculturales, fenómenos capaces de provocar transformaciones decisivas en la sociedad y la economía (Montoya, 2004).

De las corrientes teóricas reseñadas, en esencia, se desprende el papel importante que juegan la ciencia y la tecnología en la transformación del aparato productivo y las relaciones sociales. Al respecto, se observa que en muchos países las políticas públicas orientadas a la ciencia y la tecnología ocupan un lugar superior en el diseño de estrategias para el desarrollo frente a la formulación de otro tipo de acciones focalizadas, como la política industrial (Zerda, 2003).

El diseño de política en ciencia y tecnología generalmente incluye acciones de investigación y desarrollo (I+D), las cuales son consideradas de gran valor para la creación de nuevo conocimiento y son precursoras del desarrollo. No obstante, estas actividades deben incluir la aplicación práctica de avances a través de la innovación, en el marco de una institucionalidad que permita la participación de diversos agentes. Este ciclo es denominado por Fuentes y Arguimbau (2008) como el sistema completo de la investigación (I+D+i).

De una manera más esquemática, Michel Callón planteó este ciclo o proceso de creación, difusión y uso de las innovaciones mediante el diagrama denominado “rosa de los vientos de la investigación”, en el cual los diferentes agentes que participan (directa o indirectamente) pueden ser agrupados en cinco polos, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Proceso de creación, difusión y uso de innovaciones



Fuente: elaboración propia con base en Pujol y Arguimbau (2008, p. 49).

Este sistema plantea diferentes niveles y grados de participación de los agentes en la generación o difusión de conocimiento. Sin embargo, vale la pena señalar dos factores determinantes para el logro de su fin último, es decir, potenciar el desarrollo económico y la competitividad empresarial. En primer lugar, este tipo de sistemas debe contar con los incentivos adecuados para fomentar la coordinación y convergencia entre agentes para el logro de propósitos comunes, aspecto que usualmente se busca con la conformación o implementación (no necesariamente formal) de los sistemas de CTI. En segundo lugar, se plantea la necesidad de analizar y evaluar periódicamente el proceso con el fin de tomar decisiones de política pública, temas que se abordan en el siguiente numeral.

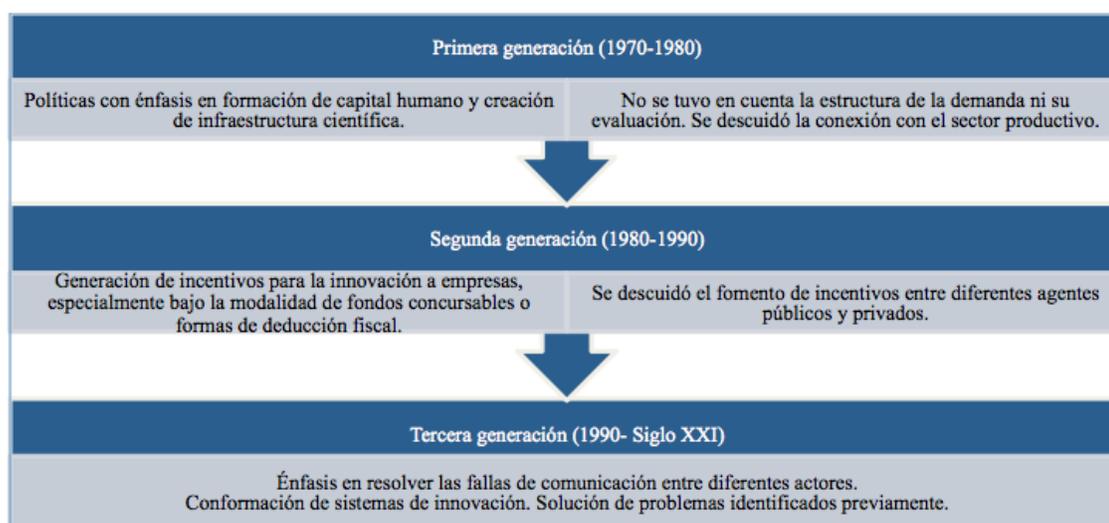
Diseño y ejecución de política pública en la región

De acuerdo con Pagés (2010), la principal razón del modesto crecimiento económico de Latinoamérica es la baja productividad de los países de la región. Esta autora precisa que mientras en 1960 el ingreso per cápita de la región representaba una cuarta parte del ingreso de Estados Unidos, para 2005 esta proporción

equivalía a una sexta parte (Pagés, 2010, p. 10). Por lo tanto, se plantea la necesidad de diseñar políticas ambiciosas para el uso adecuado de los recursos existentes en la región, es decir, más eficiencia de la mano de obra, el capital físico y humano y el despliegue de tecnologías que permitan reducir la brecha de ingreso

de Latinoamérica frente al resto del mundo. A partir de ello, en materia de política pública de fomento a la ciencia, la tecnología y la innovación, se puede apreciar tres enfoques generacionales en los últimos cuatro decenios, los cuales se detallan en la figura 3.

Figura 3. Generalidades de políticas públicas en materia de CTI en Latinoamérica



Fuente: elaboración propia con base en Pagés (2010).

En la figura 3 se observa cómo la política pública en CTI en Latinoamérica evolucionó desde los programas focalizados a la formación científica —un poco desconectados de las necesidades de las naciones— hasta el diseño de sistemas de CTI con énfasis en la generación de incentivos adecuados para facilitar la integración y convergencia de intereses entre diferentes agentes. La evolución mediante el cambio de enfoques no implica que el último sea incompatible con los anteriores, sino que se dio una reorientación para focalizar ciertas acciones que permitieran incrementar el potencial de innovación de la región.

A partir de la experiencia en el diseño de política en la región, se evidencia que el fomento del cambio tecnológico es fundamental. Sin embargo, no se debe descuidar la alineación de incentivos entre empresas, gobierno e instituciones, así como el diseño de mecanismos efectivos que garanticen oportunidades

y acceso justo a los recursos. Sobre el tema, la evidencia señala que las empresas de la región que más invierten en innovación no son las de mayor tamaño, las más exportadoras o aquellas con mayor capital extranjero, sino que son las empresas con acceso a financiamiento, protección eficaz de la propiedad intelectual y aquellas que cuentan con cooperación tecnológica con clientes, proveedores o entidades que intervienen en la transmisión de conocimiento aplicado (Pagés, 2010). Por ejemplo, Navarro *et al.* (2010), quienes emplearon un método cuantitativo para estimar la tendencia a invertir en innovación en Latinoamérica, dan cuenta de la relación positiva del financiamiento público para la innovación con la protección formal de la propiedad intelectual y la cooperación tecnológica entre empresas (proveedores y clientes), laboratorios y universidades (p. 270). Otros instrumentos observados por Navarro *et al.* (2010) son reseñados en la tabla 2.

Tabla 2. Instrumentos de política para fomentar la innovación en Latinoamérica (países seleccionados)

Instrumento	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	México	Panamá	Paraguay	Perú	República Dominicana	Uruguay
Primera generación													
Fondo de investigación científica y tecnológica	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Apoyo a la creación de centros de excelencia	X	X	X	X				X					X
Becas para graduados y profesionales con posgrado	X	X	X	X				X	X		X		X
Programas de apoyo a ciudadanos con estudios de posgrado en ciencia y tecnología	X	X	X	X				X	X	X			X
Incentivos salariales para la investigación en ciencia y tecnología	X							X	X				X
Fortalecimiento de nexos con investigadores nacionales que trabajan en el extranjero	X		X					X	X				X
Segunda generación													
Fondos para promover la innovación y la competitividad en las empresas	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X
Capital emprendedor, capital generador y otros instrumentos financieros para la innovación	X	X	X	X									X
Incentivos fiscales para I+D e innovación	X	X	X	X				X					
Mecanismos para promover la transferencia de tecnología y conocimiento al sector no agropecuario (extensión tecnológica, etc.)	X							X	X	X			
Tercera generación													
Fondos de innovación para sectores seleccionados con alto potencial para innovar	X	X	X					X					X
Áreas / sectores prioritarios	X	X	X	X				X		X			X
Promoción de polos de tecnología e incubadoras de negocios	X	X	X									X	X
Otros instrumentos para mejorar los sistemas regionales de innovación		X	X					X					
Mecanismos de diálogo entre actores de los sistemas nacionales de innovación (tablas de tecnología e innovación, etc.)	X	X	X					X					X

Fuente: Navarro et al. (2010).

Con respecto a la inversión pública en ACTI, es preciso señalar que en Latinoamérica esta es inferior a 1 % del PIB de cada nación, en tanto que en otros países de la OCDE esta alcanza 2,34 %. Una característica particular de la región es que la inversión tiene un componente importante en la adquisición de equipos y bienes de capital (entre 50 y 80 %), lo cual se considera excesivo, toda vez que, si bien contribuye a cerrar la brecha tecnológica, su resultado depende de las capacidades internas en I+D. En contraste, la inversión del sector privado en innovación es particularmente alta. Por ejemplo, en Colombia, 46 % de las grandes empresas innovan, mientras que en países como Chile esta cifra llega a 30 %. No obstante, en Colombia la inversión en temas de innovación es baja en comparación con el gasto en I+D como porcentaje del PIB, permaneciendo estable en torno a 0,25 %, cifra que se ubica por debajo de otros países de la región, como Brasil (1,2 %), el país con mayor inversión, Chile (0,39 %), México y Argentina (ambos alrededor de 0,5 %).

Frente al impacto de dichas inversiones, a pesar de las deficiencias y características de la inversión en innovación en Latinoamérica, algunos estudios señalan un resultado positivo sobre la productividad, aunque más en personas que en procesos, lo que algunos casos depende de las características de las empresas. En contraste, no se observan efectos significativos de las inversiones en innovación sobre la organización, o en otros casos se evidencia un efecto tardío.

Una posible explicación a los modestos resultados de las inversiones en innovación por parte del sector productivo es que los procesos de aprendizaje y adopción de nuevos métodos en las economías latinoamericanas toman más tiempo debido a la capacidad del capital humano, desincentivos para invertir decididamente en innovación y desconocimiento de los procesos de propiedad intelectual, entre otros.

Como parte de un análisis más reciente para la región, la UNESCO (2018) señala la necesidad de vincular la investigación endógena con la innovación en el sector productivo, para lo cual son necesarias

políticas sectoriales de largo plazo. Si bien en años recientes se observan algunas tendencias en este sentido (tabla 3), aún se presentan resultados variables entre países.

En este contexto, la UNESCO señala que para la reducción de la brecha entre países resulta importante aumentar el número de investigadores, así como realizar una mayor inversión en enseñanza superior, producción científica y colaboración científica internacional. Este último aspecto cobra relevancia en la coyuntura asociada con la emergencia sanitaria derivada del COVID-19, la cual ha movilizado acciones y recursos entre países e instituciones para afrontar los retos en CTI (BID, 2020). Se tiene entonces que un aspecto fundamental para el avance hacia un sistema de CTI de tercera generación, que genere incentivos adecuados y sinergias entre los diferentes agentes que lo integran, es la formación de capital humano articulado con proyectos y necesidades del sector real. En particular, esta variable se asocia con la invención en innovaciones radicales, así como la adaptación que implica la innovación incremental. Desde una perspectiva complementaria, Ibáñez (2018) realiza un análisis estadístico de variables para Latinoamérica, encontrando una relación positiva entre la extensión de un país (superficie, población, PIB, número de investigadores y número de publicaciones científicas de excelencia) y su relevancia en el contexto internacional en investigación y desarrollo tecnológico.

Con relación al efecto en el crecimiento económico, en varios países de Latinoamérica este ha sido asociado al crecimiento del capital físico y humano, y en menor medida a la productividad, lo cual se relaciona con un bajo grado de innovación en las empresas. En Colombia, al igual que en los demás países de la región, a pesar de contar con el capital humano y físico necesario, la productividad y los procesos de innovación en las empresas son bajos, lo cual se debe a que el capital humano vinculado al sector laboral no cuenta con las capacidades idóneas para innovar dentro de las empresas (figura 4).

Tabla 3. Inventario de instrumentos de política de CTI en Latinoamérica, 2010-2015 (países seleccionados)

Pais	Promover nuevas empresas en campos de alta tecnología para la generación de nuevos productos y servicios de gran especialización con un valor añadido elevado	Desarrollar recursos humanos para la investigación, la innovación y la planificación estratégica	Reforzar la apropiación social del conocimiento científico y las nuevas tecnologías	Fortalecimiento de la producción de nuevos conocimientos científicos endógenos	Desarrollo de áreas tecnológicas estratégicas y nuevos productos y servicios de nicho con alto valor agregado	Fortalecimiento de la infraestructura de laboratorios de investigación públicos y privados	Consolidar los procesos de coordinación, creación de redes e integración en el ecosistema de la investigación y la innovación, con el fin de promover las sinergias entre los sectores públicos, universitarios y productivos	Fortalecer la calidad de los estudios de prospectiva tecnológica para evaluar el potencial de los mercados de alto valor, desarrollar planes de negocios para las empresas de alta tecnología, construir y analizar escenarios a largo plazo y proporcionar servicios de consultoría e inteligencia estratégica	Fortalecimiento de los programas de educación científica en todos los niveles educativos	Fortalecer la cooperación regional e internacional para la creación de redes y la promoción de la ciencia y la tecnología	Promover los sistemas de conocimiento indígenas	Promover la igualdad de género en la investigación y la innovación	Promocionar el desarrollo de tecnologías verdes y aquellas que fomenten la inclusión social
Chile	37	25	24	25	17	12	6	14	7	6		6	
Argentina	38	25	32	22	15	9	14	12	5	10	5	2	4
Brasil	27	31	6	15	15	10	5	8	5	4		6	5
México	19	13	6	16	14	9	4	6	6	5	3	5	
Uruguay	14	11	13	13	9	3	3	8	2	4		1	3
El Salvador	2	2	5			4		6	9				1
Perú	6	12	6	10	3	7		1	5	2	1	1	
Paraguay	3	6	5	8	4	1	3	2	1	5			
Costa Rica	4	10	23	2	4	2		4	3	4		2	
Venezuela	2	3	7	5		1		2		1		2	
Panamá	4	14	6	5		2	1	1	3	1			
Colombia	6	2	10	6	1	1	2	2		1	3	1	1
Ecuador	4	5	4		2		1	1	2		4		
Guatemala	4	6	6	3				1	2				
Bolivia	5	1	8	2	1	1		3	1	1	4	1	1
Honduras	1	1	1	1					2				
Nicaragua				1		1				1			
Cuba			5					1					
República Dominicana			1										

Fuente: Unesco (2018).

Figura 4. Participación de factores en el crecimiento promedio (2000-2016)



Fuente: DNP (2019b).

Ante este escenario, cobra relevancia la contribución de la ciencia, la tecnología y la innovación a la formación para el trabajo, dinámica que busca generar capacidades en el recurso humano para fortalecer los procesos de productividad y competitividad en las empresas. Al respecto, la Oficina Regional de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) para América Latina y el Caribe y el Centro Interamericano para el Desarrollo del Conocimiento de la Formación Profesional (OIT/Cinterfor) (2017) destacan al SENA como referente, siendo muy cercano a la experiencia del Servicio Nacional de Aprendizaje Industrial (SENAI) en Brasil, que en la década de los años setenta

estableció los centros de desarrollo tecnológico con el objetivo de prestar servicios en aspectos tales como asistencia técnica, asesoría, consultoría, diseño, investigación aplicada, pruebas y ensayos de laboratorio, entre otros. Posteriormente, el SENA diversificó su campo de acción a través del Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación SENNOVA, el cual, al igual que el caso de Brasil, fortalece la idea de que la formación profesional debe apoyar la innovación y el desarrollo de capacidades productivas.

Cinterfor (2017) señala un cambio de paradigma a partir de las últimas décadas del siglo veinte, en el que la tendencia de los centros de formación a escala global busca que el desarrollo de competencias y habilidades del recurso humano esté mediado por la incorporación del diseño, la investigación y la innovación en los procesos formativos, proceso donde el SENA cuenta con una importante trayectoria en política de investigación, desarrollo tecnológico e innovación. En el caso particular del SENA, Lugo (2017) analiza los aportes de la formación profesional a los procesos de innovación, encontrando un vínculo que permite acelerar la innovación empresarial con base en la transferencia de conocimiento, la actualización tecnológica y la participación de la fuerza laboral de los trabajadores.

Evaluación de programas y diseño de una política que propende por su articulación

En el presente siglo se han llevado a cabo diferentes evaluaciones a programas o instrumentos ejecutados por entidades gubernamentales con base en el SCTI. En general, los resultados son positivos, aunque también variados, dependiendo de los objetivos y el alcance de cada iniciativa. Entre los estudios orientados a evaluar el diseño, la metodología o el impacto de programas institucionales en períodos específicos, se encuentran los trabajos realizados por SantaMaría *et al.* (2009), Tecnos (2010), la Universidad del Norte y la Universidad Industrial de Santander (2010), el Centro de Investigaciones para el Desarrollo (CID, 2010), Maffioli y Meléndez (2011) y Econometría Consultores *et al.* (2014).

Estudios más recientes se han enfocado en analizar tanto aspectos particulares como al sistema en su conjunto. Por ejemplo, un trabajo iniciado por el Banco Mundial en 2015 (Cruz *et al.*, 2019) analiza el gasto público en CTI a partir de la identificación de 129 instrumentos

pertenecientes a 8 instituciones del Gobierno Nacional, con el objetivo de evaluar la composición y coherencia de los instrumentos de la política, así como la calidad de los procesos, los sistemas y la funcionalidad de la política. Entre los principales resultados se encuentra (i) la identificación de una alta concentración del presupuesto en pocos instrumentos a nivel agregado y también a nivel de cada institución; (ii) la identificación de un grado significativo de superposición en instrumentos que tienen el mismo objetivo o beneficiario; (iii) la falta de suficientes instrumentos para la atención de empresas en estado inicial (*startups*), lo que tiene implicaciones negativas en la consecución del objetivo de diversificación económica; (iv) evidencia de que el desempeño promedio de las dimensiones de implementación y gobernanza obtuvo un mejor puntaje que las dimensiones de diseño; (v) la concentración pronunciada de los instrumentos de CTI en un número muy reducido de mecanismos de intervención (mayoritariamente subsidios); y (vi) una heterogeneidad general en el desempeño funcional dentro de cada institución.

Con base en los resultados de la primera fase del mencionado estudio, se introdujeron cambios en algunos programas en cabeza de algunos ministerios y el SENA, llegando a formular acciones que fueron contempladas en el documento Conpes 3866, Política Nacional de Desarrollo Productivo (PDP). En la segunda fase del estudio se buscó identificar la forma en que los programas implementados convierten insumos en productos y resultados esperados, a partir de un ejercicio piloto a 5 programas, a saber, Beneficios Tributarios (Colciencias, hoy Minciencias) (Minciencias, 2020a), Becas de Doctorado Colciencias (Minciencias, 2020b), Capital Semilla (iNNpulsa) (iNNpulsa, 2021), Apps.co (Ministerio de Tecnologías de Información y Comunicación TIC) (MinTIC, 2021) y Desarrollo Tecnológico (Servicio Nacional de Aprendizaje) (SENA, 2021).

Con dicho diagnóstico, el Gobierno Nacional se encuentra en el proceso de implementación de una metodología denominada “Articulación para la Competitividad, Arco” (Directiva Presidencial n.º 12 del 18 de diciembre de 2019 y circular externa del Departamento Nacional de Planeación n.º 02-4 del 16 de enero de 2020) (SNCI, 2021), cuyo propósito es evaluar y definir lineamientos orientados a mejorar la eficacia de instrumentos de política en materia de competitividad, productividad, emprendimiento,

ciencia, tecnología e innovación en las diferentes instituciones que ejecutan programas y proyectos de este tipo. El resultado esperado se centra en la articulación de entidades e instrumentos para el desarrollo de herramientas estándar, la reducción de la atomización de recursos y la obtención de mejoras en funcionalidad e impacto. En general, se observa el interés por fortalecer los diferentes aspectos que contribuyen a la consolidación de un sistema que opere de manera articulada entre los diferentes actores.

POLÍTICA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO Y FORMACIÓN PARA EL TRABAJO

Normatividad colombiana en CTI

En Colombia, a partir de la década de 1990 se observa un paulatino desarrollo de normas tendientes a fomentar condiciones que permitan crear programas y construir institucionalidad en torno a políticas de CTI. Se observa entonces que la Constitución Política de 1991 le asigna al Estado colombiano la obligación de promover la investigación, la ciencia, el desarrollo y la difusión de los valores culturales de la nación (Artículo 70, reglamentado por la Ley 1675 de 2013). De igual manera, mediante la Ley 29 de 1990, “por la cual se dictan disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico y se otorgan facultades extraordinarias”, se le asignó al Estado la promoción y orientación en torno a los adelantos científicos y tecnológicos, en articulación con la universidad, la comunidad científica y el sector privado, lo cual debe plasmarse en los planes de desarrollo. Esta norma y sus decretos reglamentarios facultan a las entidades públicas para la celebración de contratos y convenios que faciliten, fomenten o desarrollen actividades científicas y tecnológicas. En igual sentido, los decretos 393 y 585 de 1991 regulan las modalidades específicas de contratos de fomento de actividades científicas y tecnológicas entre particulares y entidades públicas. Posteriormente, la Ley 1286 de 2009 estableció que los contratos y convenios que se celebren con el objeto de promover la ciencia y la tecnología se encuentran regulados en sus aspectos sustantivos por las normas especiales de los decretos 393 y 591 de 1991; sin embargo, estos se encuentran sujetos a la Ley 80 de 1993 en todo lo no regulado por aquellas normas con fuerza legal.

En relación con la formación profesional para el trabajo, el SENA tiene entre sus funciones participar en actividades de investigación y desarrollo tecnológico, ocupacional y social que contribuyan a la actualización y el mejoramiento de la formación profesional integral (Artículo 3 de la Ley 119 de 1994). Adicionalmente, esta entidad destina parte de sus ingresos al desarrollo de programas de competitividad y productividad como parte de la contribución del Estado al SNCTI. De esta manera, el Consejo Directivo Nacional del SENA, a través de varios acuerdos, ha reglamentado los diferentes programas que contribuyen a la competitividad, el desarrollo tecnológico y la formación profesional. De igual manera, existen políticas y normas de política pública a las cuales el SENA se adhiere para el diseño de sus acciones, entre las que se incluyen el Plan Nacional de Desarrollo y las leyes y los documentos del Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes) en materia de CTI, productividad y competitividad. Sumado a lo anterior, recientemente fue expedida la Ley 1951 de 2019, por la cual se crea el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), ente rector de la política pública nacional en CTI, y se busca fortalecer el SNCTI.

Teniendo en cuenta el actual escenario, se observa que de manera paulatina se ha buscado la elaboración de normas que permitan crear incentivos para el funcionamiento de un sistema que integre los diferentes actores y además articule acciones que contribuyan al desarrollo científico y tecnológico del país.

Política de investigación, desarrollo tecnológico e innovación del SENA, SENNOVA

Desde la promulgación de la Ley 344 de 1996, en particular su artículo 16, el Consejo Directivo Nacional del SENA ha expedido acuerdos y líneas programáticas para el desarrollo de acciones de desarrollo tecnológico y competitividad, los cuales entre 1996 y 2013 fueron coordinados por diferentes áreas de la Entidad, de conformidad con los objetivos misionales de las mismas. La tabla 4 describe los principales programas enfocados a ACTI (OCyT, 2008).

De otro lado, en cuanto al manejo de recursos, entre 2002 y 2013 el SENA ejecutó COP 2,01 billones en las diferentes líneas señaladas, de conformidad con lo detallado en la tabla 5.

Tabla 4. Programas de competitividad y desarrollo tecnológico desarrollados por el SENA (1996-2013)

Área	Programa	Objetivo	Clasificación ACTI
Dirección de Formación Profesional, Dirección del Sistema Nacional de Formación para el Trabajo, Dirección de Planeación y Dirección de Planeamiento Corporativo	Innovación y desarrollo tecnológico productivo	En alianza con entidades vinculadas al SNCTI, busca cofinanciar proyectos de empresas con el propósito de contribuir al desarrollo tecnológico del país y a la implementación de procesos innovativos en el sector productivo.	Actividades de innovación
Dirección de Formación Profesional, Dirección del Sistema Nacional de Formación para el Trabajo, Dirección de Planeación y Dirección de Planeamiento Corporativo	Alianza SENA - Colciencias	Financiar actividades que promueven y fomentan la investigación aplicada, la innovación, el desarrollo tecnológico, la apropiación técnica de la ciencia, la tecnología y, en general, la construcción de capacidades regionales de ciencia, tecnología e innovación.	Administración y otras actividades de apoyo
Dirección de Formación Profesional	Modernización de la oferta de formación profesional en Centros de Formación	Modernizar y actualizar los Centros de Formación Profesional del SENA mediante la adaptación de las nuevas tecnologías, para ofrecer formación profesional por competencias laborales en los diferentes sectores productivos y con la estrategia de ambientes móviles.	Actividades de innovación
Dirección de Formación Profesional	Parques tecnológicos	Consolidar una red para promover talento hacia el desarrollo tecnológico, la innovación y el emprendimiento. Disponer herramientas, infraestructura y asesoría de expertos en un ambiente que permita la apropiación tecnológica para el desarrollo de nuevas iniciativas de productos y servicios, en líneas tales como biotecnología, agroindustria, nanotecnología, electrónica y telecomunicaciones, tecnologías virtuales, diseño e ingeniería.	Actividades de innovación
Oficina de Sistemas	SENA Digital	Fortalecer e implementar nuevos servicios de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), buscando contribuir a la provisión de información adecuada para la gestión de la entidad y garantizar el acceso de la población colombiana a las diferentes fuentes de conocimiento, los ambientes virtuales de formación y las plataformas colaborativas como elemento clave en la formación para el trabajo, la innovación y el emprendimiento.	Actividades de innovación
Dirección de Promoción y Relaciones Corporativas	Internacionalización	Apoyar el desarrollo de proyectos de cooperación internacional que permitan la transferencia de conocimientos y tecnologías al SENA.	Actividades de innovación

Fuente: Dirección de Formación Profesional del SENA.

Tabla 5. Ejecución de recursos Ley 344 de 1996 según programa (2002-2013)*

Programa	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Modernización de la oferta de formación profesional en centros de formación. Incluye parques tecnológicos	24.935	28.598	30.429	53.393	46.586	44.616	64.043	102.036	80.033	82.625	50.388	48.834
Innovación y Desarrollo tecnológico	9.798	16.423	11.863	8.629	7.642	10.958	16.374	12.514	11.240	15.016	48.512	47.016
Alianza SENA - Colciencias	-	15.000	21.828	36.481	40.123	46.025	54.545	31.495	100.367	80.155	86.224	86.224
Sena Digital	59.015	902	25.900	18.938	19.830	25.613	35.159	53.902	82.887	57.896	99.392	88.169
Internacionalización	-	1.500	893	860	1.636	1.763	8.189	1.000	-	3.167	-	-
Total	93.748	62.423	90.913	118.301	115.817	128.975	178.310	200.947	274.527	238.859	284.516	270.243

* Cifras en millones de pesos colombianos.

Fuente: Dirección de Planeación y Dirección de Planeamiento Corporativo, Dirección Administrativa y Financiera SENA, cálculos propios.

Frente a lo anterior, se evidencia una asignación importante de recursos a las estrategias de competitividad y desarrollo tecnológico del SENA, lo cual genera resultados en diferentes campos de acción según los objetivos, los programas y las instancias de la entidad responsables de su implementación. No obstante, en lo anterior no se observa una política que contenga vasos comunicantes entre las diferentes iniciativas para la generación de sinergias entre programas, lo que resulta necesario para alinear las diferentes acciones hacia propósitos, objetivos y resultados generales en el ámbito de CTI.

En este contexto, con el ánimo de generar una mayor articulación interna y externa con los diferentes actores, especialmente con la política pública, en 2014

el SENA creó el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico SENNOVA, a través del cual se ejecuta la política de contribución del SENA a la ciencia y tecnología del país de forma integral, fortaleciendo capacidades locales en productividad, competitividad y generación de conocimiento y pertinencia a través de la formación profesional impartida en la institución. Se observa que el concepto se acerca al proceso de creación, difusión y uso de las innovaciones (Pujol & Arguimbau 2008), aproximándose al concepto de sistema que toma fuerza en la política pública del país y el ámbito internacional (Navarro *et al.* 2010; UNESCO, 2018). SENNOVA comprende tres programas y diez líneas programáticas según los principales objetivos de la entidad (tabla 6).

Tabla 6. Programas del SENNOVA (2014-2020)

Programa	Línea	Objetivo	Clasificación ACTI
Innovación	Cultura en Ciencia, Tecnología e Innovación	Fortalecer e incentivar actividades de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación en los centros de formación por medio de publicaciones científicas, gestión de eventos de divulgación y diversas acciones para promover la cultura I+D+i en las regiones.	Actividades de innovación
	Fomento a la Innovación y Desarrollo Productivo en alianza con las Empresas y Centros de Formación	En centros de formación SENA: generar alternativas de solución de alta aplicabilidad a las necesidades y apuestas de productividad y competitividad de las regiones mediante financiación de proyectos de I+D+i en alianza con empresas y entidades con presencia territorial.	Actividades de innovación
		En el sector productivo: realizar acciones que contribuyan al fortalecimiento de los procesos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en el sector productivo colombiano, cuyos resultados incidan sobre los niveles de productividad y competitividad del mismo, así como en la formación profesional integral y la formación para el trabajo.	Actividades de innovación
Investigación	Investigación Aplicada y Semilleros de Investigación en Centros de Formación Grupos y Semilleros.	Generar capacidades de ciencia, tecnología e innovación en los centros de formación SENA a través de grupos y semilleros de investigación, como estrategias para fortalecer la formación profesional y contribuir a la productividad, competitividad y generación de conocimiento en las regiones.	Investigación y Desarrollo Experimental (I+D):
	Gestión del Conocimiento	Promover un enfoque colaborativo e integrado para la identificación, creación, captura, codificación, comunicación, utilización, y almacenamiento de los activos intelectuales del SENA de manera efectiva y para que generen el mayor valor posible en los Centros de Formación y en las empresas.	Actividades de innovación

Programa	Línea	Objetivo	Clasificación ACTI
Desarrollo tecnológico	Tecnoparque	Desarrollar proyectos que materialicen los conceptos de proyectos de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación en prototipos funcionales y productos que promuevan el emprendimiento de base tecnológica, la productividad de las empresas y la transferencia de conocimientos.	Actividades de innovación
	Tecnoacademia	Desarrollar habilidades, destrezas y competencias orientadas a la innovación, la ciencia y la tecnología en ambientes dotados por tecnologías emergentes que fomenten en niños y jóvenes de educación básica y media su vocación hacia la CTI.	Actividades de innovación
	Fortalecimiento de la Oferta de Servicios Tecnológicos para las Empresas	Fortalecer la oferta de servicios tecnológicos para el sector productivo y el SENA, orientados a la solución de fallas de mercado, articulación, gobierno o programas de formación, que sean pertinentes con la misionalidad de la entidad.	Actividades de innovación
	Actualización y Modernización Tecnológica de los Centros de Formación	Desarrollar proyectos orientados a la adopción de tecnologías y actualización de ambientes, apoyando el fortalecimiento de proyectos de I+D+i ejecutados por los grupos de investigación y favoreciendo el mejoramiento tecnológico de las herramientas y condiciones de los ambientes para responder a los procesos de calidad en los programas de formación de los Centros del SENA.	Actividades de innovación
	Extensionismo Tecnológico	Desarrollar y fortalecer las capacidades locales en transferencia tecnológica, a centros de formación, entidades para capacitar extensionistas y el escalamiento de la metodología en las empresas del sector productivo a través de extensionistas tecnológicos.	Actividades de innovación

Fuente: Grupo SENNOVA.

Adicional a la articulación de los diferentes programas en torno a objetivos de política de CTI, en la estructura de SENNOVA se promovió la conformación de grupos y semilleros de investigación en los diferentes centros de formación del SENA, los cuales constituyen el brazo operativo para el desarrollo de los proyectos que se ejecutan internamente en la entidad, junto con el establecimiento de tecnoparques, tecnoacademias y laboratorios en los centros de formación del país. Además de lo anterior, se conformaron equipos de profesionales en cada uno de estos centros con instructores investigadores, gestores y líderes, quienes contribuyen a la implementación de las estrategias diseñadas. De igual manera, existen proyectos que se desarrollan con organizaciones del sector productivo

y actores del ecosistema de CTI, los cuales mantienen una constante interacción con los centros de formación, grupos y semilleros de investigación en beneficio de los objetivos de la política institucional, particularmente en lo relacionado con la formación para el trabajo.

De acuerdo con Silva (2012), en los centros de formación del SENA se contaba con 28 grupos de investigación conformados y funcionando, de los cuales 6 tenían registro ante Colciencias y 2 manifestaron encontrarse en el proceso de obtención de dicho registro. De los grupos registrados en Colciencias, 1 contaba con categorización D. Por regiones, estos se encontraban en Antioquia (2), Bolívar (1), Boyacá (3),

Cauca (1), Cundinamarca (3), Bogotá (2), Huila (1), Quindío (2), San Andrés (1), Santander (8) y Valle del Cauca (4). A partir de la implementación de la estrategia SENNOVA se logró un cambio significativo, por lo que en la actualidad los 117 centros de formación del SENA cuentan con al menos un grupo de investigación, para un total de 119 grupos, ubicados en los 33 departamentos del país. En la más reciente convocatoria de reconocimiento y medición de grupos de investigación de Colciencias (2018), del total de grupos de investigación del SENA, se obtuvo la categorización de 1 grupo en la categoría A, 9 grupos en la categoría B y 75 en C, logrando además el reconocimiento de 2

grupos más (sin categorización), para un total de 89 grupos registrados.

En cuanto a la administración de recursos, la tabla 7 precisa el presupuesto ejecutado por SENNOVA entre 2014 y 2020 según el tipo de programa. Esta información permite observar una inversión total de COP 873.000 millones, de los cuales 7 % corresponde a investigación y desarrollo experimental y 93 % a actividades de innovación. Este monto resulta significativo si se compara con la inversión pública en ACTI reportada por universidades o centros de desarrollo tecnológico.

Tabla 7. Ejecución de recursos por parte del SENA SENNOVA según programa (2014-2020)*

Línea programática	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Actualización y modernización tecnológica de los centros de formación	-	20.000	31.749	29.094	23.785	35.172	35.014
Extensionismo tecnológico	-	2.565	-	4.411	1.000	4.000	4.095
Cultura en CTI	449	6.019	9.532	9.624	10.698	12.215	12.950
Fomento de la innovación y desarrollo tecnológico en las empresas - Centros SENA	-	7.641	10.508	10.205	11.249	12.352	6.272
Fomento de la innovación y desarrollo tecnológico en las empresas – Sector productivo	12.120	23.828	24.537	25.220	22.865	26.525	32.210
Fortalecimiento de la oferta de servicios tecnológicos para las empresas	7.329	21.902	23.387	22.414	23.949	24.276	20.494
Gestión del conocimiento	-	-	-	422	3.469	3.673	3.641
Investigación aplicada y semilleros de investigación en centros de formación	4.000	8.120	9.414	9.313	9.659	11.431	11.422
Tecnoparque	13.821	18.447	14.279	10.965	15.800	15.351	15.923
Tecnoacademia	-	-	6.232	8.578	15.171	22.214	19.560
Total	37.719	108.522	129.638	130.246	137.645	167.209	161.581

* Cifras en millones de pesos colombianos.

Fuente: Dirección Administrativa y Financiera del SENA, cálculos propios.

En materia de resultados, a continuación se reseñan algunos aspectos de la inversión de los recursos en proyectos ejecutados por los grupos de investigación y los tecnoparques y tecnoacademias de los centros de formación. La tabla 8 precisa el número de proyectos realizados por centros de formación y sus grupos y semilleros de investigación, así como los ejecutados por tecnoparques, tecnoacademias y laboratorios del SENA. En concordancia con el paulatino proceso de

implementación de SENNOVA, y a medida que se van generando sinergias entre los actores que participan en la estrategia, en general, se observa un crecimiento en el número de proyectos por programa y en el total. Frente a la clasificación ACTI, aproximadamente 30 % de los proyectos se concentra en investigación y desarrollo experimental y el 70 % restante en actividades de innovación.

Tabla 8. Número de proyectos desarrollados en SENNOVA por línea programática (2017-2019)

Programa	2017	2018	2019
Actualización y modernización tecnológica de los centros de formación	96	160	131
Cultura en ciencia, tecnología e innovación	112	118	144
Fomento de la innovación y desarrollo tecnológico en las empresas - Centros SENA	158	211	209
Fomento de la innovación y desarrollo tecnológico en las empresas - Convocatoria externa	121	97	127
Fortalecimiento de la oferta de servicios tecnológicos para las empresas	55	54	70
Investigación aplicada y semilleros de investigación en centros de formación grupos y semilleros	204	228	242
Total	625	771	796

Fuente: Grupo SENNOVA.

Según el área de conocimiento de los proyectos, entre 2017 y 2019 el mayor porcentaje de las iniciativas ejecutadas se concentra en ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines (52,4 %), seguido de agronomía, veterinaria y afines (14,4 %), ciencias de la educación (7,8 %), matemáticas y ciencias naturales (7,1 %), economía, administración, contaduría y afines (5,9 %) y bellas artes (4,3 %). Las ciencias de la salud y las ciencias sociales y humanas registran una participación de 4 %, cada una.

Tabla 9. Número de proyectos desarrollos en SENNOVA por área del conocimiento (2017-2019)

Área de conocimiento	Número de proyectos	%
Ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines	1.149	52,4
Agronomía, veterinaria y afines	316	14,4
Ciencias de la educación	172	7,8
Matemáticas y ciencias naturales	156	7,1
Economía, administración, contaduría y afines	129	5,9
Bellas artes	94	4,3
Ciencias de la salud	88	4,0
Ciencias sociales y humanas	88	4,0
Total general	2.192	100

Fuente: Grupo SENNOVA.

Al analizar los resultados por departamento, se observa una distribución relativamente equitativa entre 2017 y 2019, en el sentido en que todas las regiones del país desarrollan proyectos SENNOVA en las diferentes líneas programáticas. Adicionalmente, las

cifras muestran que todos los grupos de investigación participan en estos proyectos y la mayoría de ellos desarrolla un número de proyectos cercano al promedio nacional (18).

Tabla 10. Número de proyectos desarrollos en SENNOVA por región y número de grupos de investigación (2017-2019)

Departamento	Grupos de investigación	Número de proyectos	Promedio por grupo
Amazonas	1	16	16
Antioquia	16	266	17
Arauca	1	17	17
Atlántico	4	116	29
Bolívar	4	79	20
Boyacá	4	71	18
Caldas	5	114	23
Caquetá	1	15	15
Casanare	1	21	21
Cauca	3	43	14
Cesar	3	61	20
Choco	1	15	15
Córdoba	3	46	15
Cundinamarca	6	124	21
Distrito Capital	16	263	16
Guainía	1	12	12
Guajira	2	37	19
Guaviare	1	15	15
Huila	5	94	19
Magdalena	2	31	16
Meta	2	34	17
Nariño	4	75	19
Norte de Santander	2	46	23
Putumayo	1	16	16
Quindío	3	52	17

Departamento	Grupos de investigación	Número de proyectos	Promedio por grupo
Risaralda	3	60	20
San Andrés	1	10	10
Santander	8	174	22
Sucre	1	23	23
Tolima	3	62	21
Valle	12	151	13
Vaupés	1	15	15
Vichada	1	18	18
Total general	122	2.192	18

Fuente: Grupo SENNOVA.

El anterior resultado refleja un aspecto positivo de la distribución de los recursos, toda vez que para la aprobación de los proyectos existe un proceso de evaluación que verifica aspectos de la formulación. En este sentido, las regiones de menor desarrollo tienen las mismas oportunidades de recibir apoyo para sus iniciativas que las demás regiones del país.

Con respecto al programa de innovación y desarrollo tecnológico que ejecutan las empresas, el SENA, a través de SENNOVA, ejecutó un rediseño a partir de las recomendaciones de la evaluación de impacto realizada por Econometría Consultores (2014), con

lo cual en las convocatorias realizadas a partir de 2015 se logró incrementar el número de empresas beneficiadas, así como la participación de las micro y pequeñas empresas (tabla 11).

Tabla 11. Proyectos de innovación y desarrollo tecnológico ejecutados en empresas

Departamento	2010-2014		2016-2018		2019-2020	
	Proyectos	Cofinanciación*	Proyectos	Cofinanciación*	Proyectos	Cofinanciación*
Amazonas	-	-	2	274.355.800	1	200.000.000
Antioquia	80	12.721.621.310	28	5.242.662.179	24	4.278.180.727
Arauca	-	-	2	387.129.327	2	398.680.000
Atlántico	10	1.793.040.180	24	4.710.097.769	15	2.939.776.034
Bogotá D.C.	64	16.100.740.813	28	5.520.010.057	39	7.303.525.080
Bolívar	13	2.757.150.989	10	1.718.448.258	6	1.126.510.000
Boyacá	2	320.556.838	10	1.727.341.875	6	1.087.779.356
Caldas	9	1.113.394.748	14	1.995.085.304	6	1.198.723.608
Caquetá	-	-	6	1.091.115.640	1	161.500.382
Casanare	-	-	6	508.062.553	2	353.655.272
Cauca	1	167.672.100	7	984.941.511	6	1.115.092.722
Cesar	2	76.300.000	5	926.376.981	4	781.009.135
Chocó	-	-	6	688.094.000	2	392.741.779
Córdoba	-	-	4	698.847.452	5	990.012.043
Cundinamarca	11	1.464.195.274	6	1.098.605.894	6	1.137.186.000
Guainía	-	-	3	246.060.000	-	-
Guaviare	-	-	1	103.040.620	-	-
Huila	5	1.378.251.173	11	2.239.510.981	7	1.346.753.204
La Guajira	3	423.458.800	6	810.304.708	1	200.000.000
Magdalena	1	60.881.000	5	791.367.650	5	975.666.811
Meta	3	367.559.687	5	632.616.046	6	1.158.377.685
Nariño	6	1.022.336.028	9	1.339.267.030	6	1.069.358.088
Norte de Santander	-	-	6	1.125.035.532	4	713.573.064
Putumayo	-	-	5	979.738.916	1	199.260.000

Departamento	2010-2014		2016-2018		2019-2020	
	Proyectos	Cofinanciación*	Proyectos	Cofinanciación*	Proyectos	Cofinanciación*
Quindío	1	94.373.507	9	1.279.813.725	6	1.045.634.356
Risaralda	10	2.584.547.107	31	5.050.104.198	18	3.380.672.533
San Andrés y Providencia	-	-	4	691.793.068	-	-
Santander	8	3.881.652.639	24	4.762.903.822	14	2.728.331.300
Sucre	-	-	5	836.865.968	3	595.100.000
Tolima	3	274.019.866	11	1.858.794.480	6	1.190.364.852
Valle del Cauca	6	1.266.101.473	29	4.744.041.428	21	3.986.101.121
Vaupés	-	-	2	131.872.580	-	-
Vichada	-	-	2	314.254.900	1	195.030.514
Total	238	47.867.853.532	326	55.508.560.252	224	42.248.595.666

* Cifras en pesos colombianos.

Fuente: Grupo SENNOVA.

Entre 2016 y 2018, SENNOVA, a través de este programa, aprobó proyectos en los 33 departamentos del país, cuando entre 2010 y 2014 llegó a solo 20 departamentos, con una concentración significativa en Bogotá y Antioquia. Para los procesos realizados en 2019-2020 se lograron resultados similares en cobertura y tamaños de empresas. Estos resultados se obtuvieron a través del diseño de acciones regionales y la vinculación de expertos al ecosistema de CTI, con el fin de apoyar la generación de capacidades en formulación y gestión de proyectos (2016-2018), iniciativa en la que también participaron Minciencias y el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (2019-2020). Adicionalmente, con ocasión de la ejecución de proyectos conjuntos con empresas, los centros de formación participaron en procesos de transferencia de tecnología que incluyeron la participación de aprendices e instructores, la realización de pasantías, la donación de prototipos y la adquisición de material para diseño o actualización de programas, entre otros.

Con base en los resultados señalados, se evidencia el relacionamiento entre los grupos y semilleros de investigación, especialmente, así como entre los demás programas institucionales, actores e instituciones del ecosistema de CTI, formando la aparición de laboratorios ciudadanos similares a algunas experiencias de ciencia pública y participativa, tendencia que comienza a marcarse y que tendrá influencia en el diseño futuro de política de CTI (Meissner *et al.*, 2021).

De manera particular, se resalta el beneficio para la formación profesional, que mediante los diferentes programas permite la generación y actualización de conocimientos para aprendices, instructores y programas. Sumado a ello, a través de la interacción con otros instrumentos, entidades y programas de gobierno, se contribuye a generar sinergias y fomentar la eficiencia en el gasto público en CTI en Colombia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A nivel conceptual, aunque con diferentes matices y enfoques, se reconoce la importancia de combinar factores productivos, de capital y de trabajo, así como a la ciencia y la tecnología, en la transformación del aparato productivo, lo cual resulta fundamental dentro de las políticas de desarrollo y además propicia la vinculación de agentes con diferentes intereses, pero que trabajan en la ejecución de acciones interrelacionadas.

A nivel de política pública en Latinoamérica, en las últimas décadas se observa una evolución que va de programas focalizados en formación científica (un poco desconectada con las necesidades reales) al diseño de sistemas de CTI con énfasis en la generación de incentivos adecuados, los cuales facilitan la integración y convergencia de intereses entre los diferentes agentes involucrados.

Frente a los resultados de la política pública, se observa que la inversión es considerablemente inferior a la de países europeos o aquellos que son miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Sin embargo, pese a las deficiencias y características de la inversión en innovación, algunos estudios señalan un resultado positivo sobre la productividad, aunque con efectos tardíos, en algunos casos. Dentro de las posibles explicaciones a esta situación se puede atribuir la capacidad del capital humano para adaptarse a los nuevos desarrollos, la preferencia del sector productivo por inversiones con rendimientos rápidos, los costos asociados al aprendizaje y la inclinación de las empresas a realizar procesos de innovación en períodos de desaceleración económica, entre otros.

En cuanto a la formación profesional, la evidencia internacional señala su integración con elementos de desarrollo tecnológico, asistencia técnica, consultoría, diseño, investigación aplicada, pruebas y ensayos de laboratorio, entre otros. En ese sentido, y teniendo en cuenta los planteamientos de política pública en cuanto a sistemas de ciencia, tecnología e innovación, SENNOVA constituye una estrategia que se encuentra alineada con objetivos institucionales y de política pública, por lo que es razonable dar continuidad y mayor profundidad a esta iniciativa. En efecto, a partir de la conformación de este sistema se observa que —aunque la mayoría de acciones se concentra en actividades de innovación— la importancia del desarrollo de proyectos de investigación y de desarrollo experimental, a la par con el fortalecimiento de los grupos de investigación, es notable, toda vez que estos no tenían mayor participación en el pasado. Por otra parte, se observa que las acciones en innovación, investigación y desarrollo experimental del SENA guardan coherencia con la tendencia a conformar sistemas que fortalezcan su vínculo con la formación del recurso humano y el sector productivo.

Con base en los resultados y su articulación con políticas locales e internacionales, la estrategia SENNOVA constituye un referente en la formulación e implementación de política en CTI. En particular, SENNOVA ha fomentado la apropiación tecnológica, social y colectiva al transferir el conocimiento generado en los proyectos de los diferentes programas a los procesos de formación profesional, tanto para

aprendices como instructores y demás actores del sector productivo en las diferentes regiones, contribuyendo así con la disminución de brechas tecnológicas en el país.

Por lo anterior, se recomienda llevar a cabo una evaluación de impacto que permita analizar cualitativa y cuantitativamente los resultados de esta estrategia institucional, con el objetivo de diseñar políticas de largo plazo que incidan sobre el desempeño de los diferentes actores públicos y privados y como un aporte a nuevas iniciativas y propuestas de política pública en CTI.

REFERENCIAS

- Amankwah-Amoah, J. (2016). The evolution of science, technology and innovation policies: A review of the Ghanaian experience. *Technological Forecasting & Social Change*, 110, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.022>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID] (2020). *Respuestas al COVID-19 desde la ciencia, la innovación y el desarrollo productivo*. BID.
- Centro de Investigaciones para el Desarrollo [CID]. (2010). *Evaluación de impactos de proyectos de investigación y desarrollo e innovación financiados por Colciencias en el periodo 1999-2005*. CID.
- Centro Interamericano para el Desarrollo del Conocimiento de la Formación Profesional [Cinterfor]. (2017). *El futuro de la formación profesional en América Latina y el Caribe*. OIT.
- Cruz, M., Frias, J., Iaconove, L., Cirela, X., & Medvedev, D. (2018). *Análisis de eficiencia del gasto público en ciencia, tecnología e innovación en Colombia* (documento de trabajo). Banco Mundial.
- Congreso de Colombia. (27 de febrero de 1990). Ley 29 de 1990. *Por la cual se dictan disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico y se otorgan facultades extraordinarias*. Diario Oficial 39205.

- Congreso de Colombia. (23 de enero de 2009). Ley 1286 de 2009. *Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, se transforma a Colciencias en Departamento Administrativo, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 47241.
- Congreso de Colombia. (24 de enero de 2019). Ley 1951 de 2019. *Por la cual crea el ministerio de ciencia, tecnología e innovación, se fortalece el sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 50846.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [Conpes]. (2009). *Política Nacional de Ciencia, Tecnología e innovación*. Conpes.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [Conpes]. (2016). *Política Nacional de Desarrollo Productivo*. Conpes.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [Conpes]. (2020). *Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2030*. Conpes.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2019a). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Pacto por Colombia, pacto por la equidad*. DNP.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2019b). Índice departamental de innovación para Colombia. DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/PresentacionIDICValledelCauca.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2020). *Lineamientos para la optimización y articulación de la oferta de instrumentos de política pública para la competitividad y la innovación* (circular externa 02-4). DNP.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2019), *Boletín técnico encuesta de desarrollo e innovación tecnológica sector industria manufacturera 2017-2018*. DANE.
- Econometría Consultores. (2014). *Evaluación Programa de Innovación de Innovación y Desarrollo Tecnológico* (documento de trabajo). Econometría Consultores.
- Fernández-Sastre, J., & Montalvo-Quizhpi, F. (2019). The effect of developing countries' innovation policies on firms' decisions to invest in R&D. *Technological Forecasting & Social Change*, 143(2), 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.02.006>
- Fundación Andina para el Desarrollo Tecnológico y Social [Tecnos] (2010). *Informe ejecutivo, Evaluación de Impactos de Proyectos de Investigación y Desarrollo e Innovación financiados por Colciencias en el período 1999-2005 en la Región Occidente*. Tecnos.
- Hernández, I. (2004). Los modelos de difusión evolucionista. Una aproximación institucional. *Cuadernos de Economía*, 23(40), 79-110.
- Ibáñez, J. (2018). La ciencia en Latinoamérica: tendencias y patrones. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 7(1), 23-39. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.69409>
- iNNpuls Colombia. (2021). *Fortalecemos a los emprendedores y empresarios de Colombia*. <https://www.innpulsacolombia.com/>
- Lugo, C. (2017). *Los técnicos de la innovación*. Universidad de Salamanca.
- Maffioli, A., & Meléndez, M. (2011). *El uso de indicadores para la evaluación de programas de ciencia, tecnología e innovación: el caso de Colciencias* (documento de trabajo). BID.
- Meissner, D., Sarpong, D., Ofosu, G., & Botchie, D. (2021). The rise of do-it-yourself (DiY) laboratories: Implications for science, technology, and innovation (STI) policy. *Technological Forecasting & Social Change*, 165, 120589. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120589>

- Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación [Minciencias]. (2020a). *Beneficios tributarios apalancan 50% más de inversiones en CTeI en el 2020*. [https://www.minciencias.gov.co/sala_de_prensa/beneficios-tributarios-apalancan-50-mas-inversiones-en-ctei-en-el-2020#:~:text=\(%40mincienciasCo\)%20El%20Consejo%20Nacional,a%20las%20empresas%20en%20alianza](https://www.minciencias.gov.co/sala_de_prensa/beneficios-tributarios-apalancan-50-mas-inversiones-en-ctei-en-el-2020#:~:text=(%40mincienciasCo)%20El%20Consejo%20Nacional,a%20las%20empresas%20en%20alianza)
- Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación [Minciencias]. (2020b). *Convocatoria Doctorados, Gobierno de Colombia*. <https://minciencias.gov.co/convocatorias/formacion-y-vinculacion-capital-humano-alto-nivel/convocatoria-doctorados-en-el>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [MinTIC]. (2021). *Apps.co*. <https://apps.co/765/w3-channel.html>
- Montoya, O. (2004). Schumpeter, innovación y determinismo tecnológico. *Scientia et Technica*, 2(25), 209-213.
- Navarro, J., Llisterri, J., & Zúñiga, P. (2010). La importancia de las ideas: innovación y productividad en América Latina. En C. Pagés (ed.), *La era de la productividad. Cómo transformar las economías desde sus cimientos* (pp. 265-303). BID.
- Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología [OCyT]. (2008). *Cálculo de la inversión en actividades de ciencia, tecnología e innovación. Guía para el formulario de inversión a ACTI*. OCyT
- Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología [OCyT]. (2019). *Indicadores de ciencia y tecnología 2018*. OCyT
- Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología [OCyT]. (2020). *Indicadores de ciencia y tecnología 2019*. OCyT.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (2018). *Informe de la UNESCO sobre la Ciencia, hacia 2030: informe regional de América Latina y el Caribe*. UNESCO.
- Pagés, C. (ed.). (2010). *La era de la productividad. Cómo transformar las economías desde sus cimientos*. BID.
- Pardini, R., Bertuol-García, D., Demasi-Araújo, B., Mesquita, J. P., Moraes-Murer, B., Carmo-Ponzio, M., Silvério-Ribero, F., Laganaro-Rossi, M., & Prado, P. I., (2021). COVID-19 pandemic as a learning path for grounding conservation policies in science. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(2), 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.02.009>
- Peijie, W., & Fan L. (2021). Science, technology and innovation policy in Russia and China – Mapping and comparisons in objectives, instruments and implementation. *Technological Forecasting & Social Change*, 162, 120386. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120386>
- Presidencia de la República de Colombia. (8 de febrero de 1991). Decreto 393 de 1991. *Por el cual se dictan normas sobre asociación para actividades científicas y tecnológicas, proyectos de investigación y creación de tecnologías*. Diario Oficial 39672.
- Presidencia de la República de Colombia. (26 de febrero de 1991). Decreto 585 de 1991. *Por el cual se crea el consejo nacional de ciencia y tecnología, se reorganiza el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Colciencias, y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 39702.
- Presidencia de la República de Colombia. (18 de diciembre de 2019). Directiva Presidencial No. 12. *Optimización y articulación de la oferta de instrumentos de política pública para la competitividad y la innovación*. Diario Oficial 51701.

Pujol, E., & Arguimbau, L. (2008). I+D+I: Una perspectiva documental. *Anales de Documentación*, 11, 43-56.

Santa-María, M., Acosta, P., Estacio, A., Millán, N., Olivera, M., & Parra, M. (2009). *Evaluación de impacto de tres programas y línea de base de un programa del Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, Informe Final*. Fedesarrollo.

SENNOVA. (2021). *Sistema de gestión de información de proyectos*. <http://sennova.senaedu.edu.co/>

Silva, M. (2012). *Encuesta sobre grupos de investigación y políticas editoriales a los Centros de Formación Profesional* (documento de trabajo, Dirección del Sistema Nacional de Formación para el Trabajo). SENA.

Sistema Nacional de Competitividad e Innovación [SNCI]. (2021). *Articular para la competitividad, Gobierno de Colombia*. <http://www.colombiacompetitiva.gov.co/prensa/articular-para-la-competitividad>

Universidad del Norte [UN], & Universidad Industrial de Santander [UIS]. (2010). *Evaluación de Impactos de Proyectos de Investigación y Desarrollo e Innovación financiados por Colciencias en el período 1999-2005 en la Región Nororiental. Informe Final*. UN & UIS.

Zerda, A. (2003). Ciencia y tecnología en el Plan de Desarrollo. *Cuadernos de Economía*, 22(39), 124-132.

Evaluación rápida de las familias y grupos tróficos de aves asociadas a sabanas y bosques de galería en la Reserva El Caduceo, La María (San Martín, Meta, Colombia)

Rapid Assessment of the Families and Groups of Trophic Birds Associated with Savannas and Gallery Forests at El Caduceo Nature Reserve, La María (San Martín, Meta, Colombia)

Luis Alejandro Yañez-Dukon^{ab}, Nixon Fernando Vargas Hernández^a, Isabela Forero Espinosa^a, Pablo Locano Montoya^a, Jordan Steven Ruiz Toquica^{ac}

^a Programa de Biología Marina, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia

^b luisa.yanezd@utadeo.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-6141-0412>

^c jordan.ruiz@utadeo.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-5456-2434>

RESUMEN

La Reserva El Caduceo, ubicada en San Martín, Meta, es un área que ha experimentado notables modificaciones en la complejidad estructural de la vegetación de bosques y sabanas debido al efecto de diferentes actividades de

cultivo y ganadería, las cuales pueden afectar la riqueza de las comunidades de aves que allí habitan. Este estudio corto muestra una evaluación de la composición y abundancia a nivel de familias y grupos tróficos de aves en esta reserva durante la época lluviosa de 2020. Se llevaron a cabo censos visuales con límite de tiempo en dos estaciones correspondientes a dos hábitats: bosque de galería y sabana con pequeños núcleos de bosque. Además, se estimaron algunos índices ecológicos para cada estación de muestreo. Se observó un total de 18 familias, de las cuales la familia Tyrannidae fue la más abundante en la sabana y la familia Psittacidae la más recurrente en el bosque de galería. La densidad de aves fue mayor en el bosque de galería (2,19 ind/m²), observando además que en esta estación las densidades de

Citation: Yañez-Dukon, L. A., Vargas-Hernández, N. F., Forero-Espinosa, I., Locano-Montoya, P. y Ruiz-Toquica, J. S. (2021). Evaluación rápida de las familias y grupos trófico de aves asociadas a sabanas y bosques de galería en la Reserva El Caduceo, La María (San Martín, Meta, Colombia). *Mutis*, 11(2),132-142. <https://doi.org/10.21789/22561498.1705>

Recibido: 16 de diciembre de 2020. **Aceptado:** 30 de marzo de 2021.

Copyright: ©2021. Yañez-Dukon, L. A., Vargas-Hernández, N. F., Forero-Espinosa, I., Locano-Montoya, P. y Ruiz-Toquica, J. S. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.



aves se encuentran equitativamente repartidas entre las familias registradas, en contraste con la estación de sabana. Por otro lado, el grupo trófico dominante en ambas estaciones fueron los “insectívoros”. Estos resultados preliminares podrían indicar una relación directa entre la complejidad estructural vegetativa, la recuperación del bosque de galería en esta zona y la composición de aves y grupos tróficos predominantes. No obstante, futuros estudios con mayor duración y monitoreos constantes son necesarios para confirmar esta observación inicial.

Palabras clave: avifauna, sabanas, bosques de galería, grupo trófico.

ABSTRACT

El Caduceo Nature Reserve, located in San Martín, Meta, is an area that has undergone notable modifications in the structural complexity of the vegetation of its forests and savannas due to different farming and livestock activities, which could affect the richness of resident bird communities. This brief study shows an evaluation of the composition and abundance at the level of families and trophic groups of birds in this reserve during the rainy season of 2020. Visual censuses with a time limit were carried out in two stations corresponding to two habitats: gallery forest and savanna with small core forest. Some ecological indices were estimated for each sampling station as well. A total of 18 families were observed, with the Tyrannidae family being more abundant in the savannah, while the Psittacidae family in the gallery forest. The density of birds was higher in the gallery forest (2.19 ind/m²), station in which bird densities are equitably distributed among the recorded families, in contrast to what occurs in the savanna station. On the other hand, the dominant trophic group in both stations were “insectívoros.” These preliminary results could indicate a direct relationship between the vegetative structural complexity, the recovery of the gallery forest in this area, and the composition of birds and predominant trophic groups. However, future studies with longer duration and constant monitoring are necessary in order to confirm this introductory observation.

Keywords: Avifauna, savannas, gallery forests, trophic group.

INTRODUCCIÓN

Colombia es considerado un país megadiverso y de alto valor para la conservación (Fonseca & Mahecha, 2018), siendo reconocido por la alta diversidad de aves que alberga, pues cuenta con aproximadamente 1.909 especies, ocupando el primer lugar a nivel global en este grupo (Asociación Colombiana de Ornitología, 2020). Entre las regiones más diversas del país, la Orinoquía se destaca por la riqueza de aves, ya que en esta se han registrado cerca de 761 especies, es decir, aproximadamente 19 % de las especies a nivel mundial y 47,6 % de las especies registradas para el país (Tamaris-Turizo *et al.*, 2017), las cuales están representadas por 106 familias, entre las que se encuentran las familias Tyrannidae, Thamnophilidae, Thraupidae, Furnariidae y Trochilidae, las más representativas de la región (Acevedo-Charry *et al.*, 2014). Tal diversidad se encuentra concentrada en los ecosistemas de altillanuras, sabanas inundables, bosques de galería, bosques subandinos y bosques del escudo Guyanés, entre otros, típicos de esta región (Peñuela *et al.*, 2011).

La Orinoquía ha sufrido notables modificaciones paisajísticas a causa de diferentes actividades antropogénicas tales como la ganadería, la expansión de la frontera agrícola y plantaciones de palma africana, lo cual ha alterado la composición y complejidad estructural de la vegetación de tal forma que sus paisajes se están volviendo monótonos, lo que a su vez genera un impacto sobre la diversidad de aves que alberga esta región (a mayor complejidad, mayor diversidad de aves) (Huertas-Ramírez & Huertas-Herrera, 2015; Peñuela *et al.*, 2011; Tamaris-Turizo *et al.*, 2017). Un ejemplo de ello es la zona de San Martín, en el departamento del Meta, específicamente en la Reserva el Caduceo, donde ha ocurrido una sucesión ecológica del bosque debido a la ganadería extensiva y los cultivos de palma de aceite, actividades que han generado cambios en la composición y estructura de la vegetación (Díaz, 2016; Tamaris-Turizo *et al.*, 2017).

Las aves desempeñan un papel ecológico importante en estos ecosistemas boscosos dada su alta interacción directa e indirecta con las comunidades forestales (Winkler & Preleuthner, 2001). Además, gracias a

sus dietas, estos organismos ayudan a determinar la estructura y organización de las comunidades, bien sea regulando procesos de flujo de energía o intervinendo en el intercambio genético de la vegetación al ser dispersores de semillas (González-Salazar *et al.*, 2014; Olsen, 2017; Taylor *et al.*, 2017), ocupando así diferentes grupos tróficos, que son distinguibles por las diversas formas de sus picos (González-Salazar *et al.*, 2014; Martínez *et al.*, 2010). A pesar de esta importancia, existen pocos registros actuales sobre la diversidad de aves asociadas a San Martín, Meta. Los estudios más recientes de aves en el municipio fueron realizados por Tamaris-Turizo *et al.* (2017), además de un registro fotográfico de la composición de aves a nivel de familia en la reserva El Caduceo realizado por Melo-Velasquez y Vega-Araque (2019).

El presente estudio muestra una aproximación a la composición de aves a nivel de familia y de grupos tróficos en sabanas y bosques de galería de la Reserva El Caduceo, San Martín (Meta, Colombia). Para ello, se evaluó la estructura (composición y abundancia a nivel de familia) de dos comunidades de aves a través de censos visuales. Así mismo, se evaluó la estructura de los grupos tróficos de la zona con base en lo reportado en la literatura.

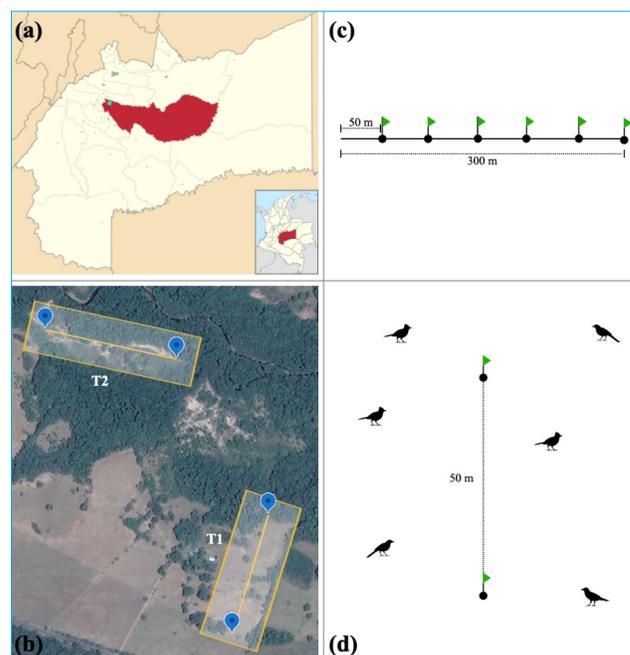
METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo los días 14 y 15 de noviembre de 2020 en la Reserva El Caduceo, ubicada en el área rural de San Martín, departamento del Meta, Colombia (figura 1a), la cual tiene una elevación de 377,8 m s. n. m. (Fonseca & Mahecha, 2018) y se localiza entre los 03°40'17" N y los 73°39'34" W, limitando al norte con los municipios de Guaymaral, Castilla La Nueva, San Carlos De Guaroa y Puerto López, al sur con Fuentedeoro, Puerto Lleras y Mapiripán, al oeste con Granada, El Castillo, El Dorado y Cubarral, y al este con Puerto Gaitán (León & Mojica, 2018). La temperatura promedio anual en esta zona es de 26 °C, con oscilaciones entre 23,1 y 28,2 °C, mientras que las precipitaciones promedio anuales son de 255,4 mm, con regímenes de lluvia que se extienden desde el mes de abril hasta noviembre y períodos secos que van desde diciembre hasta marzo (Cantillo, 2009; Fonseca & Mahecha, 2018).

La reserva cuenta con un área de 173 ha, de las cuales el 60 % de la vegetación corresponde a sabanas naturales y pastos introducidos, mientras que el 40 % restante corresponde a bosque de galería y pequeños núcleos de bosque aislados en la sabana, como matas de monte y arbustales (Casallas-Pabón *et al.*, 2017). Las especies vegetales dominantes de esta zona corresponden a *Euterpe precatória* e *Iriartea deltoidea* (Bosque de vega), *Vismia mocanera*, *Dicanopteris* sp. (brizal), *Vismia* sp., *Solanum quitoense* y *Sepium* sp. (vegetación pionera), *Mauritia flexuosa*, *Matayba*, *Jacarda* y otras de la familia Melastomataceae. En bosque secundario se encuentra *Sclerobium* y *Virola* (León & Mojica, 2018). Una gran parte de los bosques de galería se encuentran asociados a varios cuerpos de agua, entre ellos, arroyos, ríos y caños (León & Mojica, 2018), de los cuales el caño Camoa atraviesa el área de estudio al norte del campamento, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Área de estudio



(a) ubicación de la Reserva El Caduceo, La María, San Martín (Meta, Colombia); (b) ubicación de las estaciones 1 (T1) y 2 (T2) dentro de la reserva; (c) disposición de los puntos de muestreo dentro del transecto de 300 m; (d) recuento en el punto dentro del transecto sin estimación de distancia.

Fuente: adaptado de Wikipedia (2012) y Google Maps (2020).

Muestreo

Se siguió la metodología propuesta por Gallina y López-González (2011), con algunos ajustes. La selección de los transectos dentro del área de estudio se basó en los criterios propuestos por Moreno (2017), con algunas modificaciones, entre las cuales se incluyeron: constituir una unidad discreta de paisaje (sabanas y bosque de galería, respectivamente) y ubicar el transecto en una altitud y pendiente de interés. Para ello, se dispusieron dos estaciones de muestreo: la estación 1 (T1, 3°39'23" N, 73°39'23" W a 382 m s. n. m. y 3°39'48" N, 73°39'26" W a 374 m s. n. m.), representada por una unidad paisajística de sabanas y pequeños núcleos de bosques de galería (figura 1b); y la estación 2 (T2, 3° 40' 09" N, 73°39'30" W a 400 m s. n. m. y 03°40'11.6" N, 073°39'40" W a 359 m s. n. m.), representada por bosques de galería asociados al caño Camoa (figura 1b). En cada estación se marcó un transecto de 300 m, señalando seis puntos de conteo separados a una distancia de 50 m entre sí (figura 2c). En cada punto se realizó un censo visual durante 10 min, con recuentos sin estimación de distancia (MacGregor-Fors *et al.*, 2010; González-García, 2011) (figura 2d). El área total de muestreo de cada estación fue de 39,302 m², con un perímetro de 942,65 m.

Las observaciones de aves se realizaron en dos momentos del día para cada transecto, en la mañana entre 6:00 y 7:00 a. m. y en la tarde entre 5:00 y 6:00 p. m., utilizando binoculares 8x40. Los avistamientos se registraron teniendo en cuenta las indicaciones de Ralph *et al.* (1996), es decir, fecha, zona, observador, número de visita, transecto, punto de conteo, hora de muestreo, familia de aves observadas y número de individuos visualizados.

La identificación de aves a nivel de familia se llevó a cabo siguiendo la guía fotográfica de Melo-Velasquez y Vega-Araque (2019). Luego de haber identificado las familias, se hizo una búsqueda en la literatura sobre cada grupo con base en la dieta típica de las aves reconocidas, esto con el fin de observar los grupos tróficos que se pueden estar dando dentro de la comunidad de avifauna.

Análisis de datos

Se calcularon la densidad promedio y la abundancia relativa. Los índices de dominancia de Simpson (λ),

equitatividad de Pielou (J) y similitud de jaccard (I_j) se hallaron mediante las siguientes fórmulas, tomadas de Ramírez (2006):

Índice de dominancia de Simpson (λ)

$$\lambda = \sum_{i=1}^s p_i^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Índice de equitatividad de Pielou (J)

$$J = \frac{H'}{\ln(S)} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde S es el número de familias presentes, N es el número total de individuos y p_i es el número de individuos de la familia i .

Coefficiente de similitud de jaccard (I_j)

$$I_j = \frac{c}{a+b-c} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde a es el número de especies presentes en el sitio A, b es el número de especies presentes en el sitio B y c es el número de especies presentes en ambos sitios, A y B.

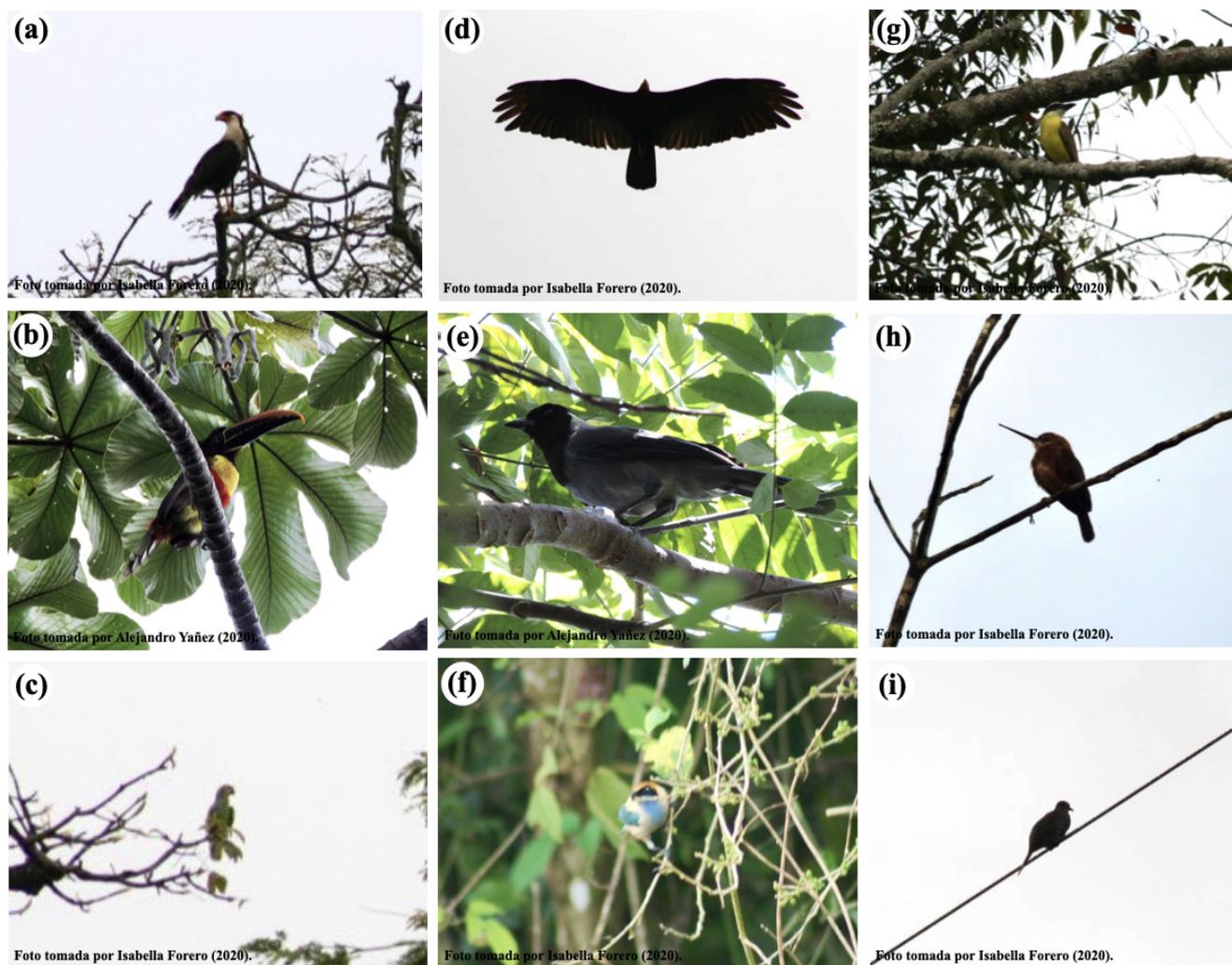
RESULTADOS

Se registró un total de 136 individuos, distribuidos entre 18 familias de aves (anexo 1), de las cuales, las familias Falconidae, Galbulidae, Icteridae, Thraupidae y Tyrannidae estuvieron presentes en ambas estaciones. En T1 (estación 1, representada por la sabana) se observó un total de 11 familias, con una densidad total de 1,27 ind/m². La familia Tyrannidae (24 %) fue la más abundante, seguida de Passerellidae (16 %) e Icteridae (14 %), mientras que las de menor abundancia fueron Thamnophilidae y Picidae (2 %) (figura 2a).

La comunidad evaluada mostró una dominancia $\lambda = 0,12$ (anexos 2 y 3), con una equitatividad de $J = 0,05$. Por su parte, en T2 (estación 2, dominada por el bosque de galería) se observó un total de 12 familias, con una densidad $2,19 \text{ ind/m}^2$, donde la familia Psittacidae (40,7 %) fue la más abundante, seguida de Galbulidae (18,6 %) y Falconidae (15,1 %). Las familias de menor

abundancia fueron Tyriridae, Icteridae, Furnariidae, Corvidae y Ardeidae (1,2 %) (figura 2b). En esta estación, la comunidad mostró una dominancia $\lambda = 0,23$ (anexos 4 y 5) y una equitatividad $J = 0,72$. En cuanto a la diversidad beta, es decir, entre las dos comunidades evaluadas, se obtuvo un $I_b = 0,28$.

Figura 2. Algunas de las familias de aves identificadas en la Reserva El Caduceo, La María, San Martín (Meta, Colombia)



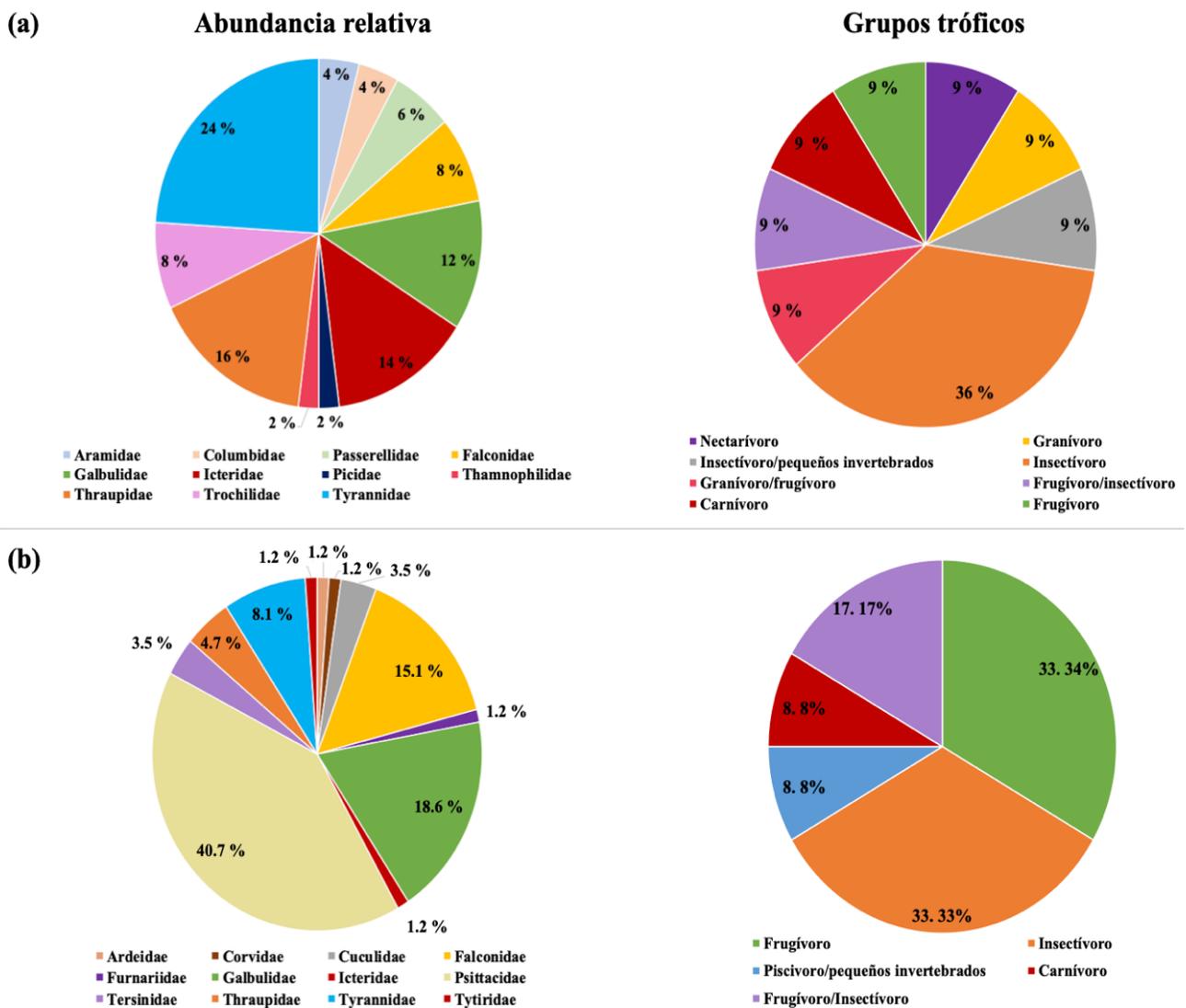
(a) Falconidae, (b) Ramphastidae, (c) Psittacidae, (d) Cathartidae, (e) Corvidae, (f) Thraupidae, (g) Tyrannidae, (h) Galbulidae y (i) Columbidae.

Fuente: elaboración propia.

En relación con la diversidad trófica, en T1 se identificaron ocho grupos tróficos, siendo el grupo insectívoro (36 % de las familias) el más representativo (figura 3), y el cual incluye a las familias Picidae, Tyrannidae, Trochilidae y Thraupidae. Las familias representadas por los grupos restantes se muestran en el anexo 1. En cuanto a T2, se identificaron cinco grupos tróficos, siendo los grupos frugívoro (33,34 % de las

familias) e insectívoro (33,33 %) los más representativos (figura 3). Estos grupos incluyeron las familias Corvidae, Psittacidae, Tersinidae y Tityridae (frugívoras) y Cuculidae, Furnariidae, Galbulidae y Tyrannidae (insectívoras). Las familias representadas por los grupos carnívoros, que tuvieron una menor representación, se detallan en el anexo 1.

Figura 3. Abundancia relativa y porcentajes de grupos tróficos de las aves registradas en la estación 1 (a) y la estación 2 (b) en la Reserva El Caduceo, La María, San Martín (Meta, Colombia)

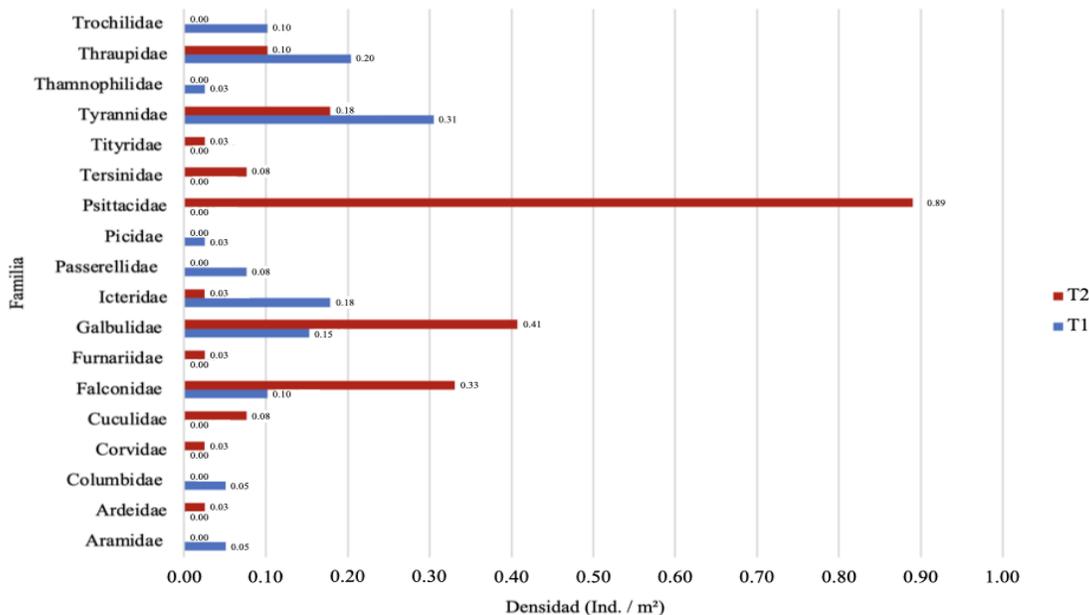


Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la densidad relativa, se observó que en T1 la familia Tyrannidae fue la más abundante (0,305 ind/m²), seguida de Thraupidae (0,204 ind/m²) e Icteridae (0,178 ind/m²). Las familias menos representadas fueron Thamnophilidae y Picidae, con densidades de 0,025 ind/m² (figura 4). Por otro lado, en

T2 la familia Psittacidae fue la más abundante (0,891 ind/m²), seguida de Galbulidae (0,407 ind/m²) y Falconidae (0,331 ind/m²). Las familias menos abundantes en esta estación fueron Tytiridae, Icteridae, Furnariidae, Corvidae y Ardeidae, con densidades de 0,025 ind/m² (figura 4).

Figura 4. Densidad relativa de las familias de aves registradas en la estación 1 y la estación 2 en la Reserva el Caduceo, La María, San Martín (Meta, Colombia)



Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los rangos propuestos por Ramírez (2006) y con base en el índice de dominancia de Simpson (λ), se puede afirmar que las comunidades evaluadas no presentan familias de aves dominantes ($0 < \lambda \leq 1$). El índice de equitatividad de Pielou en T1 muestra que las densidades poblacionales no están bien repartidas entre las 11 familias registradas, mientras que para T2 las densidades poblacionales se encuentran equitativamente repartidas entre las 12 familias ($0 < J \leq 1$) (Ramírez, 2006). Estas diferencias pueden estar asociadas al tipo de hábitat que predomina en cada estación, dado que se ha visto que a mayor complejidad estructural vegetativa, mayor

composición de especies de aves. Adicionalmente, se sabe que los bosques de galería son espacios con mayor estratificación tanto horizontal como vertical, lo cual genera una mayor disponibilidad de hábitats y nichos ecológicos para distintas especies de aves (Ramírez-Albores, 2010).

Las comunidades evaluadas exhiben una similitud muy baja ($0 < I_j < 0.5$) (Ramírez, 2006). Esta diferencia en la composición de familias entre las dos estaciones puede deberse al cambio de unidad paisajística, dado que T1 es una zona que ha sido intervenida por actividades de monocultivos, cuya intensificación puede generar un paisaje más abierto y, con ello, desencadenar la migración de aves arbóreas

y la inmigración de aves no arbóreas (Bolwig *et al.*, 2016). Estos hallazgos concuerdan con lo expuesto por Tamaris-Turizo *et al.* (2017), quienes mencionan que las zonas intervenidas suelen estar dominadas por un número reducido de aves, relegando a aquellas aves asociadas a los bosques, las cuales quedan confinadas en estas zonas, como posiblemente sucede en T2. Esto también puede estar relacionado con la densidad de aves, que fue mayor en T2 con relación a T1, lo que puede soportar que el bosque de galería podría mostrar mayor complejidad estructural, como sostienen algunas investigaciones que sugieren que la abundancia disminuye en zonas donde la complejidad estructural es menor a causa de actividades antropogénicas (Salas-Correa & Mancera-Rodríguez, 2018). Así, este bosque de galería, que se encuentra en un proceso de sucesión ecológica (Díaz, 2016; Tamaris-Turizo *et al.*, 2017), puede estar adquiriendo mayor complejidad estructural, lo cual podría ser un indicativo de su recuperación.

Esto último puede estar relacionado con los grupos tróficos que allí predominan, puesto que en esta reserva existen zonas que han sufrido notables modificaciones paisajísticas a causa de diferentes actividades antropogénicas (Huertas-Ramírez & Huertas-Herrera, 2015; Peñuela *et al.*, 2011; Tamaris-Turizo *et al.*, 2017). Por ello, la predominancia de grupos tróficos como los insectívoros y frugívoros puede permitir la recuperación de la zona y aumentar la complejidad paisajística a través de su capacidad de dispersión de semillas (Herrera, 2004; Stratford & Pekerciođlu, 2015). Las aves insectívoras, por su parte, influyen en el crecimiento de los árboles al reducir el efecto de herbivoría por parte de los artrópodos folívoros (Stratford & Pekerciođlu, 2015), por lo que sus preferencias en la dieta contribuyen en el aumento de la complejidad estructural en T2 (Stratford & Pekerciođlu, 2015; Tamaris-Turizo *et al.*, 2017). Estos grupos tróficos se ven favorecidos durante las épocas de lluvia (tiempo en el que se realizó el muestreo) debido a que hay mayor disponibilidad de agua y, por lo tanto, una mayor estimulación en la producción de hojas y frutos, lo que aumenta la productividad neta del bosque, favoreciendo las comunidades de artropofauna (Clavijo-Awazacko & Amarillo-Suárez, 2013; Stratford & Pekerciođlu, 2015; Zuluaga, 2017). Esto se traduce en una mayor disponibilidad de recursos alimenticios tanto para aves frugívoras como insectívoras.

Adicionalmente, se resalta que en T1 se evidenció predominancia de las aves insectívoras, lo cual concuerda con estudios previos en zonas de monocultivos, donde esta preferencia dietaria actúa como control de insectos que representan un riesgo para estas actividades (Achondo *et al.*, 2011; Azhar *et al.*, 2013; Enríquez, 2006).

Finalmente, la similitud encontrada entre la presencia de algunas familias y las dos estaciones de muestreo puede deberse a la dependencia de las aves hacia los bosques (Enríquez, 2006), puesto que en ambas estaciones fue posible encontrar bosques de galería; aunque en T1 se observaron pequeños núcleos de bosques aislados. Esto puede estar relacionado con las preferencias de hábitat, dado que el común denominador entre las familias Falconidae, Galbulidae, Icteridae, Thraupidae y Tyrannidae es su preferencia por hábitats de tipo boscoso (Fraga, 2008; Fuchs *et al.*, 2015; Graber *et al.*, 1974; Mason & Burns, 2015; Pinheiro & Campos, 2019). Lo anterior sugiere la importancia de mantener fragmentos boscosos en zonas intervenidas, considerando que estos tendrían efectos positivos sobre la avifauna y, por ende, sobre la diversidad de estas áreas.

CONCLUSIÓN

Este estudio permite una evaluación rápida de la composición a nivel de familia y de grupos tróficos de aves a partir de sus hábitos dietarios, mostrando de forma preliminar la relación entre estos atributos y la complejidad estructural del bosque de galería en recuperación. A pesar de ello, se requieren más estudios que permitan validar esta afirmación y que relacionen de forma directa la diversidad de aves y las preferencias dietarias con el tipo de vegetación, así como la composición de la comunidad vegetal. No obstante, se resalta la importancia de las funciones tróficas que predominan en esta zona, las cuales pueden estar asociadas con el aumento de la complejidad paisajística, especialmente en los núcleos de bosque de galería. Se sugieren futuros estudios de mayor duración y más robustos que permitan validar los hallazgos aquí presentados, así como la realización de evaluaciones del estado de la diversidad en otras zonas de la reserva que puedan estar afectadas por las actividades antropogénicas allí desarrolladas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano y a los programas de Biología Marina y Biología Ambiental, de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, por la oportunidad de desarrollar ejercicios de campo dentro de las asignaturas, los cuales permiten obtener resultados relevantes para su divulgación como ejercicios académicos. También agradecen al doctor Miguel Ángel Suárez, representante legal de La Reserva El Caduceo, quien amablemente prestó apoyo logístico para el trabajo en campo, y al personal de la reserva.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

Los autores declaran que ningún organismo fue capturado ni lastimado durante los muestreos desarrollados.

REFERENCIAS

- Acevedo-Charry, O., Pinto-Gómez, A., & Rangel-Ch, J. (2014). Las aves de la Orinoquía colombiana: una revisión de sus registros. En J. O. Rangel-Ch (ed.), *Colombia. Diversidad Biótica XIV. La región de la Orinoquía de Colombia* (pp. 691-750). Universidad Nacional de Colombia & Instituto de Ciencias Naturales.
- Achondo, M., Casin, L., Bello, V., Tanalgo, K., Agduma, A., Bretaña, B., Mancao, L., Salem, J., & Supremo, J. (2011). Rapid assessment and feeding guilds of birds in selected rubber and oil palm plantations in North Cotabato. *Asian Journal of Biodiversity*, 2, 103-120. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i4.26266>
- Asociación Colombiana de Ornitología. (2020). *Lista de referencia de especies de aves de Colombia – 2020 (V2)* [Data set/checklist]. Asociación Colombiana de Ornitología. <http://doi.org/10.15472/qhsz0p>
- Azhar, B., Lindenmayer, D., Wood, J., Fischer, J., Manning, A., McElhinny, C., & Zakaria, M. (2013). The influence of agricultural system, stand structural complexity and landscape context on foraging birds in oil palm landscapes. *Ibis*, 155, 297-312. <https://doi.org/10.1111/ibi.12025>
- Bolwig, S., Pomeroy, D., Tushabe, H., & Mushabe, D. (2006). Crops, trees, and birds: Biodiversity change under agricultural intensification in Uganda's farmed landscapes. *Geografisk Tidsskrift*, 106, 115-130. <https://doi.org/10.1080/00167223.2006.10649561>
- Cantillo, A. (2009). *Diversidad del ensamblaje de renacuajos de un bosque de galería y su relación con las variables ambientales y estructurales en la Reserva El Caduceo, San Martín, Meta* (tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana). Repositorio Pontificia Universidad Javeriana.
- Casallas-Pabón, D., Calvo-Roa, N., & Rojas-Robles, R. (2017). Murciélagos dispersores de semillas en gradientes sucesionales de la Orinoquía (San Martín, Meta, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 22(3), 348-358. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n3.63561>
- Clavijo-Awazacko, H., & Amarillo-Suárez, Á. (2013). Variación taxonómica y funcional en la artropofauna asociada a comunidades vegetales en humedales altoandinos (Colombia). *Revista Colombiana de Entomología*, 39(1), 155-163.
- Díaz, I. (2016). *Paisajes palmeros en los llanos colombianos: estado, nostalgia y trabajo en San Martín, Meta* (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia.
- Enríquez, L. (2006). *Estructura y composición de la comunidad de aves asociadas a plantaciones de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) en Agropecuaria La Loma (Acacias - Meta)* (tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana). Repositorio Pontificia Universidad Javeriana.
- Fonseca, A. N., & Mahecha, O. (2018). Contribución al estudio de los arácnidos (Arachnida) asociados a un bosque de galería en Meta (Colombia). *Revista Ibérica de Aracnología*, 33(1), 123-128.
- Fraga, R. (2008). Phylogeny and behavioral evolution in the family Icteridae. *Ornitología Neotropical*, 19, 61-71. <http://hdl.handle.net/11336/80656>
- Fuchs, J., Johnson, J. A., & Mindell, D. P. (2015). Rapid diversification of falcons (Aves: Falconidae) due to expansion of open habitats in the

- Late Miocene. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 82, 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.08.010>
- Gallina, S., & López-González, C. (2011). *Manual de técnicas para el estudio de la fauna* (vol. 1). Instituto de Ecología, Universidad Autónoma de Querétaro.
- García, S., Flores, R., García, J., & Salas, J. (2019). Diversidad y estructura vertical del bosque de pino-encino en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(53), 41-63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.173>
- González-García, F. (2011). Métodos para contar aves terrestres. En S. Gallina (ed.), *Manual de técnicas para el estudio de la fauna* (pp. 128-147). Inecol.
- González-Salazar, C., Martínez-Meyer, E., & López-Santiago, G. (2014). Clasificación jerárquica de gremios tróficos para aves y mamíferos de Norteamérica. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(3), 931-941. <http://dx.doi.org/10.7550/rmb.38023>
- Google Maps. (2020, octubre 27). *Reserva El Caduceo, Colombia*. <https://www.google.com/maps/place/Reserva+El+Caduceo/@3.6667104,-73.6576606,1004mdata=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e3e08a966517f95:0x9f5470dd11190ad2!8m2!3d3.6653584!4d-73.6578285>
- Graber, J. W., Graber, R. R., & Kirk, E. L. (1974). *Illinois birds: Tyrannidae*. Illinois Natural History Survey, Prairie Research Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Herrera, C. (2004). Ecología de los pájaros frugívoros ibéricos. En J. L. Tellería (ed.), *La hornotología hoy: homenaje al Profesor Francisco Bernis* (pp. 127-153). Universidad Complutense de Madrid.
- Huertas-Ramírez, H., & Huertas-Herrera, A. (2015). Historiografía de la ganadería en la Orinoquía. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*, 6, 300-307.
- León, L., & Mojica, R. (2018). *Géneros de escarabajos coprófagos (scarabaeidae: scarabaeinae) de dos zonas de la reserva natural El Caduceo, San Martín Meta, Colombia* (tesis de grado, Universidad Pedagógica Nacional). Repositorio Universidad Pedagógica Nacional.
- MacGregor-Fors, I., Morales-Pérez, L., & Schondube, J. (2010). Migrating to the city: Responses of neotropical migrant bird communities to urbanization. *The Condor*, 112, 711-717. <https://doi.org/10.1525/cond.2010.100062>
- Mason, N., & Burns, K. (2015). The effect of habitat and body size on the evolution of vocal displays in Thraupidae (tanagers), the largest family of songbirds. *Biological Journal of the Linnean Society*, 114(3), 538-551. <https://doi.org/10.1111/bij.12455>
- Martínez, O., Olivera, M., Quiroga, C., & Gómez, I. (2010). Evaluación de la avifauna de la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Peruana de Biología*, 17(2), 197-206. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i2.28>
- Melo-Velasquez, D., & Vega-Araque, D. (2019). *San Martín del Meta, Colombia Aves de la Reserva Natural El Caduceo*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. https://fieldguides.fieldmuseum.org/sites/default/files/rapid-color-guides-pdfs/1118_colombia_birds_of_el_caduceo_natural_reserve.pdf
- Moreno, C. (2017). *Diversidad taxonómica y funcional de aves asociadas a diferentes tipos de vegetación* (tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Repositorio Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/34368>
- Olsen, A. (2017). Feeding ecology is the primary driver of beak shape diversification in waterfowl. *Functional Ecology*, 31(10), 1985-1995. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12890>
- Peñuela, L., Castro, F., & Ocampo-Peñuela, N. (2011). *Las reservas naturales del nodo orinoquia en su rol de conservación de la biodiversidad*. Fundación Horizonte Verde & Resnatur.
- Pinheiro, C. E. G., & Campos, V. C. (2019). The responses of wild jacamars (*Galbula ruficauda*, Galbulidae) to aposematic, aposematic and cryptic, and cryptic butterflies in central Brazil. *Ecological Entomology*, 44(4), 441-450. <https://doi.org/10.1111/een.12723>

- Ralph, J., Geupel, G., Pyle, P., Martin, T., DeSante, D., & Milá, B. (1996). *Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres*. U.S. Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2737/psw-gtr-159>
- Ramírez, A. (2006). *Ecología: Métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Ramírez-Albores, J. E. (2010). Diversidad de aves de hábitats naturales y modificados en un paisaje de la Depresión Central de Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 58(1), 511-528. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i1.5225>
- Salas-Correa, Á., & Mancera-Rodríguez, N. (2018). Relaciones entre la diversidad de aves y la estructura de vegetación en cuatro etapas sucesionales de bosque secundario, Antioquia, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 519-529. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.970>
- Stratford, J., & Pekerciođlu, Ç. (2015). Birds in forest ecosystems. In S. H. Kelvin, R. T. Corlett, & Y. Bergeron (eds.), *Routledge Handbook of Forest Ecology* (pp. 279-294). Routledge.
- Tamaris-Turizo, D., López-Arévalo, H., & Romero, N. (2017). Efecto de la estructura del cultivo de palma de aceite *Elaeis guineensis* (Arecaceae) sobre la diversidad de aves en un paisaje de la Orinoquía colombiana. *Revista de Biología Tropical*, 65(4), 1569-1581. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i4.26735>
- Taylor, M., Salazar, J., Enríquez, P., León-Cortés, J., & García-Estrada, C. (2017). Variation in hierarchical guild structure between two bird assemblages of a wetland in the Mexican Pacific. *Revista de Biología Tropical*, 65(4), 1540-1553. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i4.26266>
- Wikipedia. (2012, noviembre 29). *San Martín (Meta)*. [https://es.wikipedia.org/wiki/San_Mart%C3%ADn_\(Meta\)](https://es.wikipedia.org/wiki/San_Mart%C3%ADn_(Meta)).
- Winkler, H., & Preleuthner, M. (2001). Behaviour and ecology of birds in tropical rain forest canopies. *Plant Ecology*, 153, 193-202. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3606-0_15
- Zuluaga, J. (2017). *Diversidad composicional y funcional de aves en diferentes tipos de vegetación durante el periodo de lluvias en el enclave seco del Cañón del río Chicamocha, Santander* (tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Repositorio Pontificia Universidad Javeriana.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de datos recolectados a partir de los muestreos en las estaciones uno (T1) y dos (T2) en la Reserva El Caduceo, La María (San Martín, Meta, Colombia)

Familia	T1			T2			Gremio
	N.º	Ind/39.302 m ²	Pi	N.º	Ind/39.302 m ²	Pi	
Aramidae	2	0,051	4	0	0,000	0,0	Nectarívoro
Ardeidae	0	0,000	0	1	0,025	1,2	Piscívoro/pequeños invertebrados
Columbidae	2	0,051	4	0	0,000	0,0	Granívoro
Corvidae	0	0,000	0	1	0,025	1,2	Frugívoro
Cuculidae	0	0,000	0	3	0,076	3,5	Insectívoro
Emberizidae	3	0,076	6	0	0,000	0,0	Insectívoro/pequeños invertebrados
Falconidae	4	0,102	8	13	0,331	15,1	Carnívoro
Furnariidae	0	0,000	0	1	0,025	1,2	Insectívoro
Galbulidae	6	0,153	12	16	0,407	18,6	Insectívoro
Icteridae	7	0,178	14	1	0,025	1,2	Frugívoro/Insectívoro
Picidae	1	0,025	2	0	0,000	0,0	Insectívoro
Psittacidae	0	0,000	0	35	0,891	40,7	Frugívoro
Tersinidae	0	0,000	0	3	0,076	3,5	Frugívoro
Thamnophilidae	1	0,025	2	0	0,000	0,0	Frugívoro
Thraupidae	8	0,204	16	4	0,102	4,7	Frugívoro/Nectívoro
Tityridae	0	0,000	0	1	0,025	1,2	Frugívoro
Trochilidae	4	0,102	8	0	0,000	0,0	Nectarívoro
Tyrannidae	12	0,305	24	7	0,178	8,1	Insectívoro
Total	50	1,272		86	2,188		

N.º: número de individuos; Ind: individuos; Pi: Abundancia relativa.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Índice de dominancia de Simpson de la estación uno (T1)

Familia	N.º	n-1	(n)(n-1)	λ
Aramidae	2	1	2	0,12
Columbidae	2	1	2	
Emberizidae	3	2	6	
Falconidae	4	3	12	
Galbulidae	6	5	30	
Icteridae	7	6	42	
Picidae	1	0	0	
Thamnophilidae	1	0	0	
Thraupidae	8	7	56	
Trochilidae	4	3	12	Total
Tyrannidae	12	11	132	294
Total	50	49	2.450	

N.º: número de individuos; λ : dominancia de Simpson.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 3. Índice de diversidad de Shannon de la estación uno (T1)

Familia	n	Pi	Pi*Ln(Pi)	H'
Aramidae	2	0,0	-0,13	2,15
Columbidae	2	0,0	-0,13	
Emberizidae	3	0,1	-0,17	
Falconidae	4	0,1	-0,20	
Galbulidae	6	0,1	-0,25	
Icteridae	7	0,1	-0,28	
Picidae	1	0,0	-0,08	
Thamnophilidae	1	0,0	-0,08	
Thraupidae	8	0,2	-0,29	
Trochilidae	4	0,1	-0,20	
Tyrannidae	12	0,2	-0,34	
Total	50	1	-2,15	

N.º: número de individuos; Pi: abundancia relativa; H': diversidad de Shannon.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 4. Índice de dominancia de Simpson de la estación dos (T2)

Familia	N.º	n-1	(n)(n-1)	λ
Ardeidae	1	0	0	0,23
Corvidae	1	0	0	
Cuculidae	3	2	6	
Falconidae	13	12	156	
Furnariidae	1	0	0	
Galbulidae	16	15	240	
Icteridae	1	0	0	
Psittacidae	35	34	1.190	
Tersinidae	3	2	6	
Thraupidae	4	3	12	
Tyrannidae	7	6	42	Total
Tytridae	1	0	0	1.652
Total	86	85	7.310	

N.º: número de individuos; λ : Dominancia de Simpson.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 5. Índice de diversidad de Shannon de la estación dos (T2)

Familia	N.º	Pi	Pi*Ln(Pi)	H'
Ardeidae	1	0,012	-0,05	1,80
Corvidae	1	0,012	-0,05	
Cuculidae	3	0,035	-0,12	
Falconidae	13	0,151	-0,29	
Furnariidae	1	0,012	-0,05	
Galbulidae	16	0,186	-0,31	
Icteridae	1	0,012	-0,05	
Psittacidae	35	0,407	-0,37	
Tersinidae	3	0,035	-0,12	
Thraupidae	4	0,047	-0,14	
Tyrannidae	7	0,081	-0,20	
Tytridae	1	0,012	-0,05	
Total	86	1	-1,80	

N.º: número de individuos; Pi: abundancia relativa; H': diversidad de Shannon.

Fuente: elaboración propia.

MUTIS

REVISTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

Instrucciones para autores

ENVÍOS DE ARTÍCULOS

La revista *Mutis* acepta permanentemente los siguientes tipos de artículos:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación.
1. Artículo de métodos: documento que presenta la invención o estandarización de un método experimental, computacional, o educativo, entre otros.
1. Artículo de revisión (estado del arte): es una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, con el fin de dar cuenta sobre los avances y las tendencias de desarrollo de un campo particular de las ciencias naturales e ingeniería.
1. Comunicación corta: documento que presenta resultados parciales de una investigación en desarrollo cuya publicación sea de gran importancia.

Los trabajos que se presentan a consideración de la revista *Mutis*, se deben enviar a través de nuestro sistema de gestión editorial <http://goo.gl/m6Q-6FD> o vía correo electrónico a revista.mutis@utadeo.edu.co (Asunto: artículo revista *Mutis*) en formato de procesador de texto habilitado para modificaciones (Microsoft Word). El artículo debe estar escrito en español o inglés, con una extensión máxima de 25 páginas (incluyendo tablas, figuras y referencias), con márgenes simétricas de 2 cm, sin columnas, con títulos y subtítulos alineados a la izquierda, en letra Times New Roman, tamaño 12 y en espacio doble. Para facilitar el proceso de evaluación, se deben numerar todos los renglones del trabajo. Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Título. El título debe representar con precisión y de manera concisa el contenido del trabajo sin exceder 15 palabras. Se debe escribir con letras tamaño de fuente 16, en minúsculas, en negrilla y alineado a la izquierda, en idioma original y en inglés.

Autores. Debe escribirse nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. No se deben incluir títulos académicos ni las posiciones o cargos que los autores ocupan. Las afiliaciones se deben escribir en este orden: universidad, facultad, programa, laboratorio o grupo (si aplica), dirección, ciudad, país, correo electrónico del autor, número de registro en ORCID y Google Scholar. Ejemplo:

Yvonne Sarmiento Rangel,¹ Ariadna Hazel Vergel^{2*}

¹**Universidad Jorge Tadeo Lozano**, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Grupo de Investigación Genética, Biología Molecular y Bioinformática – (GENBIMOL), Carrera 4 n.º 22-61, Bogotá D. C., Colombia. CP 011110

²**Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT)**, Apartado 6, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba. CP 53000. Correo electrónico: arhazel@inivit.cu <https://orcid.org/xxx>

https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=pTZo5RoAAA&view_op=list_works

Resumen. Debe tener un máximo de 250 palabras. El texto del resumen debe ir en tamaño de fuente 12 Times New Roman. El resumen debe incluir objetivo, métodos, resultados concretos de la investigación y una conclusión general.

Palabras clave. Deben escogerse un máximo de 5 palabras claves. Palabras diferentes incluidas en el título.

Abstract. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del resumen que aparece en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para el resumen en español.

Keywords. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de las palabras clave que aparecen en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para las palabras clave en español.

Introducción. Donde se habla sobre el origen de la investigación, interés y visión general del tema a tratar.

Materiales y métodos. No aplica para artículo de revisión. Descripción detallada de técnicas, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Resultados. No aplica para artículo de revisión. Donde se hace una presentación clara de los resultados de investigación.

Discusión. Donde se realiza la interpretación y análisis de los resultados de investigación comparándolos con resultados previamente publicados. Pueden presentarse tablas o figuras para sintetizar los resultados. Si se han realizado análisis estadísticos, se deberá describir la procedencia de los datos y el método estadístico empleado.

Conclusiones. Deben basarse en los resultados obtenidos y estar relacionadas con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

Ecuaciones. Las ecuaciones se deben escribir centradas con respecto al texto principal y se deben numerar continuamente a lo largo del texto. Cada ecuación debe estar enumerada con un número entre paréntesis ubicado en el margen derecho del texto. El significado y las unidades deben explicarse inmediatamente después de la ecuación en que se utilicen por primera vez.

Cantidades y unidades. Para todas las cantidades numéricas, se debe utilizar una coma para separar los miles y un punto para indicar las cifras decimales. Se recomienda utilizar el Sistema Internacional de Unidades.

Tablas. Las tablas se deben numerar continuamente a lo largo del texto. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrilla) seguida del número arábigo consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la tabla. Tanto el

encabezado como el contenido de la tabla se deben escribir en tamaño de fuente 10. Solo deben usarse líneas horizontales para separar las entradas de la tabla. No deben usarse líneas verticales para separar las columnas. En el caso de necesitarse algún pie de tabla, este debe estar escrito con tamaño de fuente 8. Las tablas no deben duplicar la información dada en las figuras.

Figuras. Las figuras (o fotografías) se deben numerar de manera consecutiva a lo largo del texto. El rótulo de cada figura debe estar en la parte inferior de la figura y debe incluir la palabra Figura (en negrilla) seguida del número arábigo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El rótulo de la figura se debe escribir en tamaño de fuente 10. Las figuras deben incluirse como imágenes originales importadas o copiadas al archivo del trabajo desde una herramienta gráfica (por ejemplo, *Microsoft Excel*) con una resolución de 300 dpi, de tal manera que la legibilidad no se sacrifique cuando el tamaño de las figuras se ajuste durante el proceso de edición. No se publicará por ningún motivo información de fotografías descargadas de internet sin el permiso expreso del autor.

Referencias bibliográficas. Se debe utilizar a lo largo del texto el sistema de citación APA que utiliza los apellidos de autores seguidos del año de publicación entre paréntesis. La lista de las referencias se debe dar al final del documento después de la sección de Conclusiones y debe estar organizada en orden alfabético de acuerdo a la inicial del primer apellido del primer autor. En esta lista solamente se deben colocar las referencias citadas en el texto. Todas las referencias se deben escribir en tamaño de fuente 12 Times New Roman.

EJEMPLOS:

ARTÍCULO

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of food Engineering*, 58(1), 33-43.

LIBRO

Shames, I. H., & Shames, I. H. (1982). *Mechanics of fluids* McGraw-Hill.

CAPÍTULO DE LIBRO

Bertucco, A. &. (2002). Micronization of a polysaccharide by a supercritical antisolvent technique. En J. &. Williams (ed.), *Supercritical Fluids Methods and Protocols* (pp. 335-412). Humana Press, Inc.

DOCUMENTO DE INTERNET

Benson, T. (Nov. 17, 2005). *Forces on a Rocket*. [http:// exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html](http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html), accesado el XX de XX de XXXX

TESIS DE GRADO

Yépez, B. (2009). *Glicerólisis e hidrólisis de triglicéridos saturados, en dióxido de carbono supercrítico* (tesis doctoral). Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

En caso de dudas, comunicarse con el editor (revista.mutis@utadeo.edu.co). Estas instrucciones quedan supeditadas a los cambios que el Comité Editorial disponga.



ESTA REVISTA ELECTRÓNICA
ES EDITADA POR LA
UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO.
SE FINALIZÓ EN 2021