

Revista de Tecnología y Cultura

TECNURA

V.27 N.º76

ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638

Abril - Junio de 2023
Publicación trimestral



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica

Editorial

Investigación

- 12 **Actividades de construcción sencillas desarrolladas por sistemas aéreos no tripulados**
Yeyson Alejandro Becerra Mora y Dante Giovanni Sterpin Buitrago
- 31 **Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá**
Kelly Andrea Rodríguez Polo, Luis Ángel Moreno Anselmi, Carlos Andrés Gaviria Mendoza, Miguel Ángel Ospina García
- 54 **Análisis del modelo de transferencia de conocimiento en el sector palmífero colombiano**
José Ignacio Campos Naranjo, Germán Forero-Cantor
- 78 **Modelamiento de los niveles de contaminación en un tramo del río Sogamoso, mediante el acoplamiento de los métodos Lattice-Boltzmann y diferencias finitas**
Alejandro Duitama Leal, Valentina Mendoza Celedón, Luis Alfredo Montes Vides, Javier Hernán Gil Gómez, Rodrigo Elías Esquivel
- 95 **Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas**
Omar Iván Trejos Buriticá, Luis Eduardo Muñoz Guerrero
- 111 **Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas**
Fabian Andrés Bustos Murillo, Álvaro Ervey Pulido Aponte, Hernán Mauricio Rivera Escobar

144 Instrucciones para los autores

157 Instructions for authors



Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 27 - Número 76
Abril - Junio de 2023

p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Revista TECNURA
Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITOR

Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa
Universidad de Alicante, España

COMITÉ EDITORIAL

Ph.D Jimmy Barco Burgos
Concordia University, Canada

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Martín Pedro Gómez
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

EVALUADORES

Ph.D Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Corporación Universitaria del Huila

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D Carlos Aníbal Calero Valenzuela
Universidad del Cauca

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D Mónica Marcela Suarez Pradilla
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Ph.D Hector Javier Hortúa
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

Ph.D José Arturo Celis Gil
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Oreste Piro
Universidad de les Illes Balears, España

Ph.D Gustavo Adolfo Isaza Echeverry
Universidad de Caldas

COMITÉ CIENTÍFICO

Ph.D Diego Cabrera Moya
Universidad Jorge Tadeo Lozano

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D Juan Carlos López Lezama
Universidad el Bosque

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina
Universidad Autónoma Metropolitana, México

ASISTENTES DE LA REVISTA

MSc. Ronald González Silva

Ph.D. Ing. Fernando Martirena
Universidad Central de Las Villas, Cuba

COORDINACIÓN EDITORIAL

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez
Universidad de Los Andes, Colombia

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REVISTA TECNURA

La revista Tecnura es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

PERIODICIDAD

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista Tecnura están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

MISIÓN

La revista Tecnura tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

PÚBLICO OBJETIVO

La revista Tecnura está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de la ingeniería.

INDEXACIÓN

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los índices regionales pubindex indexada y clasificada en categoría B, Scielo Colombia y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCopernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace

parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile); e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORMA DE ADQUISICIÓN

La revista Tecnura se puede adquirir a través de canje o suscripción en el portal de la de la revista.

REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ph.D. Alexander Jiménez Triana

Director y Editor Revista Tecnura

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá

Teléfono: 571-3239300

Bogotá, D.C., Colombia

Correo electrónico:

tecnura.ud@udistrital.edu.co

Tecnura en internet:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

MSc. Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

MSc. Alexander Olave

DISEÑO DE CUBIERTA

Andrés Enciso

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO L^AT_EX*

MSc. Julian Arcila-Forero

*Modificada bajo las condiciones del LaTeX Project Public License <http://www.latex-project.org/lppl.txt>



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

TECNURA Journal
Technology And Culture, Affirming Knowledge
District University Francisco José De Caldas
Faculty Of Technology

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITOR

Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Martín Pedro Gómez
Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina

EDITORIAL COMMITTEE

Ph.D Jimmy Barco Burgos
Concordia University, Canada

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

Ph.D. Oreste Piro
Universidad de les Illes Balears, España

SCIENTIFIC COMMITTEE

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez
Universidad de Los Andes, Colombia

EVALUATORS

Ph.D Mario Ricardo Arbulu Saavedra
Corporación Universitaria del Huila

Ph.D Carlos Aníbal Calero Valenzuela
Universidad del Cauca

Ph.D Mónica Marcela Suarez Pradilla
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Ph.D Hector Javier Hortúa
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D José Arturo Celis Gil
Universidad Nacional de Colombia

Ph.D Gustavo Adolfo Isaza Echeverry
Universidad de Caldas

Ph.D Diego Cabrera Moya
Universidad Jorge Tadeo Lozano

Ph.D Juan Carlos López Lezama
Universidad el Bosque

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

MSc. Ronald González Silva

EDITORIAL COORDINATION

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electrical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions.

TARGET AUDIENCE

Tecnura journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological research processes in the field of engineering.

INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the

following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal.

POSTAL ADDRESS

Enviar a Ph.D. Alexander Jiménez Triana
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá
Teléfono: 571-3239300
Bogotá, D.C., Colombia
E-mail:
tecnura.ud@udistrital.edu.co
Tecnura on internet:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

STYLE CORRECTION IN SPANISH

MSc. Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

MSc. Alexander Olave

TITLE PAGE DISEGN

Andrés Enciso

LAYOUT AND L^AT_EX* DESIGN

MSc. Julian Arcila-Forero

* modified under the conditions of the LaTeX Project Public License
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>

El comité editorial de la revista **Tecnura** está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de **Tecnura** se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

Relaciones con los autores

Tecnura se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista. La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan graves circunstancias.

Relaciones con los evaluadores

Tecnura pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

Proceso de evaluación por pares

Tecnura garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

Reclamaciones

Tecnura se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

Fomento de la integridad académica

Tecnura asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

Protección de datos individuales

Tecnura garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

Seguimiento de malas prácticas

Tecnura asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. **Tecnura** garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

Conflicto de intereses

Tecnura establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, **Tecnura** committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers.
- Readers will be informed about who has funded re- search and their role in the research.

Relations with authors

Tecnura is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line. The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

Relations with evaluators

Tecnura makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

Peer review process

Tecnura ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

Claims

Tecnura is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

Promoting Academic Integrity

Tecnura ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

Protection of individual data

Tecnura guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

Tracking malpractice

Tecnura accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. **Tecnura** will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

Conflict of interest

Tecnura will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

Complaints / allegations

Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Straightforward Construction Activities Developed by Unmanned Aerial Systems **12**

Actividades de construcción sencillas desarrolladas por sistemas aéreos no tripulados

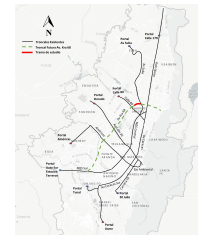
Becerra-Mora, Y. A., Sterpin-Buitrago, D. G.



Operational evaluation of BRT corridor using microscopic simulation on 68' avenue corridor at Bogotá city **31**

Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá

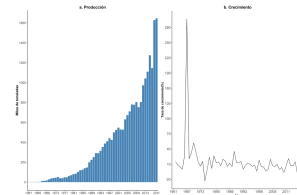
Rodríguez-Polo, K. A., Moreno-Anselmi, L. A., Gaviria-Mendoza, C. A., Ospina- García, M. A.



Analysis of the knowledge transfer model in the Colombian palm oil sector **54**

Análisis del modelo de transferencia de conocimiento en el sector palmífero colombiano

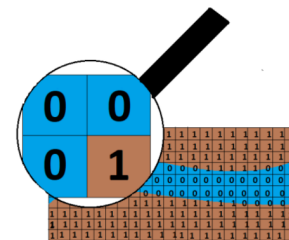
Campos-Naranjo, J. I., Forero-Cantor, G.



Simulation of pollution levels in a section of the Sogamoso River by coupling the Lattice -Boltzmann and Finite Differences methods **78**

Modelamiento de los niveles de contaminación en un tramo del río Sogamoso, mediante el acoplamiento de los métodos Lattice-Boltzmann y diferencias finitas

Duitama-Leal, A., Mendoza-Celedón, V., Montes-Vides, L. A., Gil-Gómez, J. H., Esquivel, R. E.





Learning programming computer using STEAMRW in Systems Engineering **96**

Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas

Trejos-Buriticá, O. I., Muñoz-Guerrero, L. E.

Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas

Learning programming computer using STEAMRW in Systems Engineering

Omar Iván Trejos Buriticá , Luis Eduardo Muñoz Guerrero 

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2023

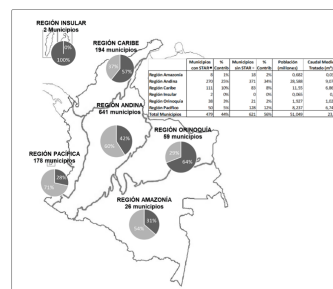
Fecha de Aceptación: 20 de noviembre de 2023

Cómo citar: Trejos-Buriticá, O. I., Muñoz-Guerrero, L. E. (2023). Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas. *Tecnura*, 27(76), 95-110. <https://doi.org/10.14483/22487638.2023>

Wastewater treatment in Colombia and bioelectrochemical systems, uses and perspectives **111**

Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas

Bustos-Murillo, F. A., Pulido-Aponte, A. E., Rivera Escobar, H. M.





Instrucciones para los autores **144**

Instructions for authors **157**

Actividades de construcción sencillas desarrolladas por sistemas aéreos no tripulados

Straightforward Construction Activities Developed by Unmanned Aerial Systems

Yeyson Alejandro Becerra Mora ¹ y Dante Giovanni Sterpin Buitrago ²

Fecha de Recepción: 24 de septiembre de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de septiembre de 2022

Cómo citar: Becerra-Mora, Y. A., Sterpin-Buitrago, D. G. (2023). Actividades de construcción sencillas desarrolladas por sistemas aéreos no tripulados. *Tecnura*, 27(76), 12-30. <https://doi.org/10.14483/22487638.18612>

Resumen

Contexto: Los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) han tomado gran relevancia en los últimos años, al integrarse en diversos sectores de la economía, como el agrícola, energético, público, construcción, entre otros. Precisamente, en este último sector, se han venido realizando avances que permiten la manipulación, transporte e identificación de elementos propios del sector, así como la cooperación entre distintos robots aéreos o robots terrestres para solucionar el problema de límite de carga, asociado a los UAV.

Método: Este trabajo está dividido en cuatro categorías en las que los UAV y los sistemas aéreos no tripulados (UAS, por su sigla en inglés) han aportado al desarrollo de actividades de construcción de forma autónoma. Se realiza una búsqueda exhaustiva mediante *Google Scholar* empleando palabras claves tales como “UAV”, “robotics”, “UAS”, “construction”, “cooperation”, “architecture” y “assembly”, las cuales permiten identificar trabajos desarrollados en este campo. En la búsqueda se realiza combinaciones entre las distintas palabras con el fin de reducir el amplio panorama que se presenta al utilizar tan solo una de ellas.

Resultados: Se obtiene un panorama de diversos sistemas aéreos no tripulados que ejecutan tareas simples que conlleven la automatización del sector de la construcción; en ese sentido, se enumeran las características, virtudes y limitantes actuales de estos sistemas, así como, los desafíos que se proponen a futuro.

Conclusiones: El mercado actual de UAV está orientado principalmente a sistemas teleoperados; sin embargo, centros de investigación han venido desarrollando UAV y UAS más autónomos. La baja capacidad de carga de estos sistemas ha sido compensada con la cooperación entre robots aéreos, terrestres e, inclusive, humanos. Dicha cooperación exige la creación de algoritmos que coordinen todos los agentes que intervienen en el sistema. Se deben tener en cuenta las condiciones del entorno de construcción, así como, la precisión y estabilidad de estos sistemas.

Palabras clave: robótica, UAV, UAS, construcción, ensamblaje.

¹Ingeniero en Automatización, máster en Automática y Robótica. Docente de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia. Email: yeyson_becerra@cun.edu.co

²Ingeniero electrónico, máster en Ingeniería de Sistemas y Computación. Docente de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia. Email: dante_sterpin@cun.edu.co

Abstract

Context: Unmanned aerial vehicles (UAV) have become very important in recent years, integrating these robots into various sectors of the economy, such as agriculture, energy, public, construction, among others; precisely in this last mentioned sector (construction), advances have been made, allowing the manipulation, transport and identification of building elements, as well as cooperation between different aerial robots and/or ground robots to solve the payload limit problem, associated with UAVs.

Method: This paper is divided into four categories where UAVs and UAS have been contributing to the development of construction activities autonomously. The first category presents works in which UAS build modular architectural structures; the second category exposes works in which UAVs are equipped with robotic arms to perform manipulation tasks; the third category presents works of cooperation between aerial robots and robots; finally, the fourth category presents unmanned aerial systems for payload transportation.

Results: An overview of various unmanned aerial systems is obtained by performing simple tasks that lead to the automation of the construction sector. The current characteristics, virtues and limitations of these systems are shown, as well as the challenges that are proposed for the future.

Conclusions: The current market for UAVs is mainly oriented towards teleoperated systems; however, research centers have been developing more autonomous UAVs and UASs. The low payload capacity of these systems has been compensated with the cooperation between aerial, terrestrial and even human robots. This same cooperation requires the creation of algorithms that coordinate all the agents that intervene in the system. The conditions of the construction environment must be taken into account, as well as the precision and stability of these systems.

Keywords: robotics, UAV, UAS, construction, assembly.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	13
Levantamiento de estructuras con UAS	15
Tareas de ensamblaje con UAV equipados con manipuladores	18
Cooperación entre robots terrestres y aéreos	20
Control en transporte de carga para UAS	22
Conclusiones	24
Referencias	25

INTRODUCCIÓN

La robótica se ha abierto un espacio en el sector de la construcción en los últimos años; diversos grupos de investigación e inclusive compañías como ABB y KUKA, le están apostando al desarrollo de plataformas robóticas que respondan a las necesidades y exigencias de este sector. Gran parte de los esfuerzos se ha centrado en generar mayor autonomía para robots

industriales en entornos cambiantes, por medio de sensores y algoritmos de control; emplear brazos robóticos y efectores finales para la elaboración de geometrías complejas; y desarrollar robots para asistir humanos en tareas de demolición u oficios riesgosos (Becerra, 2020). Estos desarrollos responden a plataformas robóticas terrestres; sin embargo, la robótica aérea también viene trabajando en el desarrollo de plataformas que permitan contribuir al crecimiento de esta industria.

Según [OxfordEconomics.com \(2011\)](#), el sector de la construcción impulsará la economía global en la presente década (2021-2030), con un crecimiento a mayor ritmo que los sectores de manufactura y servicios; no obstante, este sector presenta problemas de ineficiencia; grandes proyectos de construcción toman regularmente hasta un 20 % más de tiempo para ser finalizados, y sobrepasan hasta en un 80 % su presupuesto inicial (Agarwal *et al.*, 2016). Una de las tecnologías que promete ser clave para avanzar en esta industria es la robótica, con procesos más eficientes, precisos y seguros; con la reducción de costos y la optimización de tiempos. Debido a la crisis provocada por la covid-19, el uso de los UAV (*unmanned aerial vehicles*) se intensificó, ya que diversas compañías los adoptaron para realizar labores de vigilancia o transporte de carga (Becerra y Arbulú, 2022); aunque, estos sistemas ya venían siendo utilizados en el sector de la construcción para labores de monitoreo, inspección, topografía, levantamiento de datos, entre otras; apoyándose principalmente en sensores como cámaras RGB, multiespectrales, térmicas y lidar.

No obstante, este artículo se centra en el uso de sistemas aéreos no tripulados para ejecutar labores como ensamblaje y reparación de estructuras, levantamiento y transporte de carga, y cooperación robótica.

A diferencia de los robots industriales, los UAV cuentan con un espacio de trabajo virtualmente infinito, lo cual les permite llegar a cualquier punto del entorno de construcción; sin embargo, la manipulación de carga y la precisión en sus tareas son desafíos que tienen estos sistemas. Al pensar en construir una estructura inmobiliaria a escala real o una obra civil (puentes, represas, vías, etc.), se conoce que los elementos a manipular para ello son pesados; por tanto, un UAV debe ser de grandes dimensiones o se debe emplear un enjambre de estos (como se expone más adelante). Además, el ser un sistema que desarrolla sus tareas en el aire, lleva a tener en cuenta las perturbaciones que generan las corrientes de viento, y que pueden hacer al sistema inestable. Otro de los desafíos que se presenta con estos sistemas es su limitado tiempo de vuelo, debido a las baterías que existen actualmente en el mercado.

El presente trabajo está dividido en cinco secciones: la primera muestra la construcción de estructuras con sistemas aéreos no tripulados (UAS, por su sigla en inglés); la segunda presenta brazos robóticos integrados en UAV para realizar tareas de ensamblaje; la tercera describe trabajos de cooperación entre robots aéreos y terrestres; la cuarta trata sobre el trabajo cooperativo entre múltiples UAV y algoritmos de control para el transporte de carga; finalmente, la quinta sección ofrece algunas conclusiones.

LEVANTAMIENTO DE ESTRUCTURAS CON UAS

En los últimos años, ha venido creciendo el interés por desarrollar estructuras inmobiliarias con brazos robóticos, los cuales permiten optimizar tiempos de entrega y realizar acabados más precisos; sin embargo, su espacio de trabajo ha sido una limitante para la construcción de grandes estructuras. Una posible solución a esta problemática se encuentra en emplear UAS, ya que estos sistemas cuentan con un espacio de trabajo mucho más amplio que el de los brazos robóticos, y se ve limitado solamente por su tiempo de vuelo.

En el trabajo presentado en [Willmann *et al.* \(2012\)](#) y [Augugliaro *et al.* \(2014\)](#), se construyó una torre de seis metros de altura, con 1500 ladrillos de espuma (figura 1). La construcción de la estructura fue ejecutada por una flota de cuadricópteros, la cual empleó sensores como cámaras, GPS y lidar, para guiar a cada uno de los vehículos a locaciones específicas para recoger y dejar los módulos (ladrillos). Cada uno de los cuadricópteros contaba con una pinza para poder manipular los módulos, y eran guiados por un algoritmo que traducía el diseño computacional de la torre (geometría compleja) a puntos en el espacio.

En lugar de transportar ladrillos de un punto a otro, es posible dotar al UAV con un mecanismo dispensador de cable o cuerda, que le permita ir alrededor de objetos existentes y construir estructuras tensadas ([Mirjan *et al.* \(2013\)](#)). Diversos UAV participan en la tarea propuesta, lo cual exige comunicación y sincronización de acciones entre ellos. El entorno donde se llevaron a cabo los experimentos cuenta con un sistema de captura de movimiento que permite el seguimiento a las trayectorias deseadas en los UAV. La estructura tensada debe ser asegurada; por tanto, se debe representar y realizar nudos con el UAS, el cual debe contener información de la tipología del nudo, en la trayectoria a realizar ([Augugliaro *et al.* \(2015\)](#)). Estas trayectorias requieren estrategias de control híbridas fuerza/posición, que permitan aplicar la fuerza deseada en la posición requerida para la elaboración del nudo ([Augugliaro *et al.* \(2013\)](#)). La estructura tensada puede ser empleada para la construcción de un puente, tal y como se ve en ([Mirjan *et al.* \(2016\)](#)). En este se construyen los elementos primarios del puente entre dos estructuras de soporte distantes; posteriormente, los UAV se encargan de reforzar el montaje, trenzando los elementos primarios entre sí (figura 2).

En los trabajos propuestos en [Lindsey *et al.* \(2011\)](#), y [Lindsey y Kumar \(2013\)](#), se construyen estructuras de tipo celosía con un equipo de cuadricópteros. Estas estructuras son livianas, cuentan con partes estandarizadas y se aseguran entre ellas por medio magnético (figura 3); los UAV cuentan con pinzas para levantar, transportar y ensamblar los elementos de la estructura; y se emplea un sistema de seguimiento de movimiento para estimar el estado del UAV, así como para estimar la posición y orientación de los contenedores de las piezas. El ensamblaje de la estructura depende de información local, más no global, de su estado; además, es posible construir distintas configuraciones de la celosía.

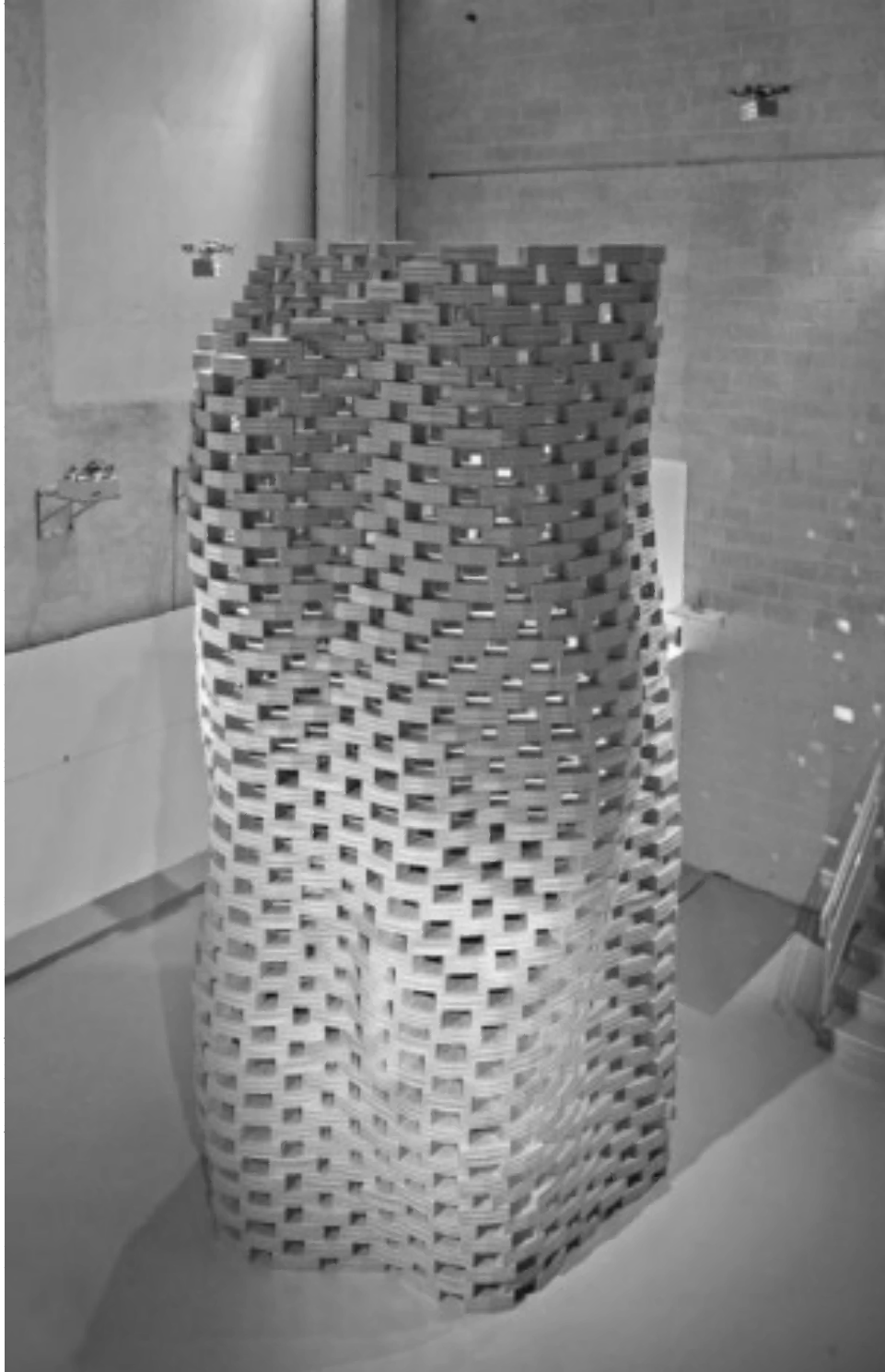


Figura 1. Torre construida de forma autónoma por una flota de UAV

Fuente: tomada de [Willmann *et al.* \(2012\)](#).

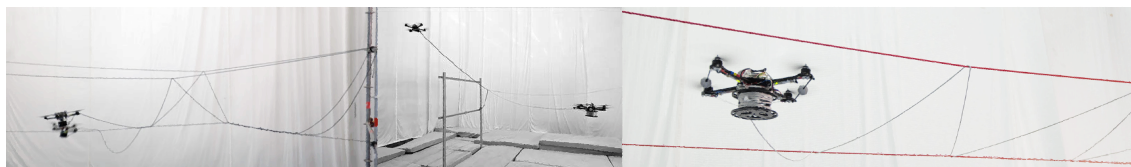


Figura 2. Torre construida de forma autónoma por una flota de UAV

Fuente: ajustado de [Mirjan et al. \(2013\)](#), [Augugliaro et al. \(2013\)](#) y [Mirjan et al. \(2016\)](#).

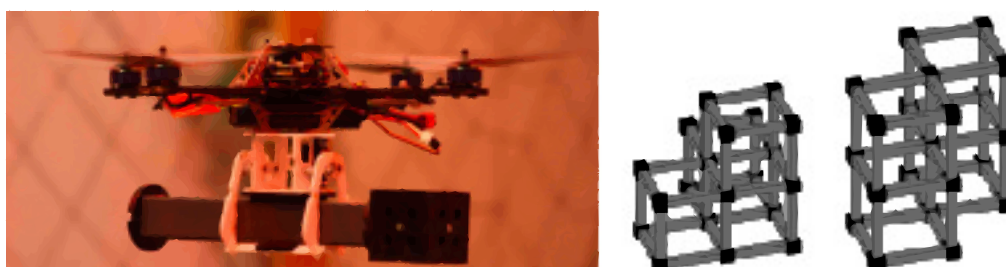


Figura 3. UAV transportando pieza (izq.). Estructura con aseguramiento magnético (der.)

Fuente: ajustado de [Lindsey et al \(2011\)](#) y [Lindsey y Kumar \(2013\)](#).

Como ya se mencionó, una de las ventajas de utilizar UAS en un entorno de construcción es su gran espacio de trabajo, lo cual permite fabricar estructuras de gran envergadura. En [Maxim et al. \(2017\)](#) se propone emplear una *robotic total station* para el guiado y control de un UAV en el devanado de fibra, que permita procesos de fabricación automatizados de estructuras arquitectónicas ligeras *in situ*. Por su parte, [Pietri y Erioli \(2017\)](#) proponen depositar material fibroso sobre encofrados inflables, mediante el empleo de enjambres de UAV, para la fabricación de envolventes arquitectónicos a gran escala. Con el uso del gran espacio de trabajo en estos sistemas y uno de seguimiento de movimiento, [Hunt et al. \(2014\)](#) plantean utilizar un UAV que deposite espuma expansiva de poliuretano en medio del vuelo, lo cual facilita imprimir estructuras para cerrar brechas en terrenos discontinuos y reparar superficies deterioradas en áreas que son inaccesibles por robots terrestres; sin embargo, se presentan algunos desafíos como estabilidad de vuelo y precisión del sistema.

Uno de los problemas al emplear UAS en labores de construcción es la baja capacidad de carga que estos tienen; [Goessens et al. \(2017\)](#) presentan un UAV de 12 kg y una capacidad de carga de 20 kg. Otro inconveniente es la falta de precisión de estos sistemas; para ello, [Goessens et al.](#) sugieren utilizar diversos elementos (sensor láser, sistema de captura de movimiento, GPS, sistema cinemático en tiempo real y una *robotic total station*), para el posicionamiento del UAV. El rediseñar los módulos para ser ensamblados en una estructura arquitectónica también ayuda a lidiar con el problema de precisión (figura 4); en [Goessens et al. \(2017\)](#) se plantean módulos de madera con conexiones especiales que permita a los UAV soltar la pieza y que esta encaje

en otras fácilmente, gracias a su configuración geométrica.



Figura 4. Módulos de madera (izq.). UAV transportando módulo de fácil ensamblado (med.). UAV con dispensador de espuma expansiva (der.)

Fuente: ajustado de [Goessens et al. \(2018\)](#), [Goessens et al. \(2018\)](#), y [Hunt et al. \(2014\)](#).

TAREAS DE ENSAMBLAJE CON UAV EQUIPADOS CON MANIPULADORES

Como es bien conocido, los brazos robóticos son sistemas precisos y con una alta capacidad de carga; sin embargo, presentan limitaciones en su espacio de trabajo, lo cual puede ser resuelto por un UAV. El sector de la construcción demanda tareas en donde, capacidad de carga, precisión y espacio de trabajo amplio son requeridos; por tal razón, se han desarrollado sistemas híbridos entre brazos robóticos y UAV.

[Kondak et al. \(2018\)](#), se articula un helicóptero autónomo con un brazo robótico, lo cual requiere de un acople cinemático y dinámico para controlar el sistema; se emplea GPS para que el helicóptero vuele a una posición específica; posteriormente, se activa el sistema de visión y seguimiento para el reconocimiento de objetos. La tarea de controlar un UAV, teniendo en cuenta el movimiento del brazo robótico, se expone en [Jiménez-Cano et al. \(2013\)](#); sistema diseñado para tareas de ensamblaje.

También han sido empleados para tareas de inspección en obras civiles. [Jiménez-Cano et al. \(2017\)](#) utilizan un brazo robótico en la parte superior de un UAV, para tomar mediciones de deflexión en la parte baja de la viga de un puente. [Chermprayong et al. \(2019\)](#) emplean un UAV con un manipulador paralelo integrado y un sistema de extrusión, para reparaciones aéreas, por ejemplo, grietas en tuberías. En el trabajo propuesto por [Kim et al. \(2016\)](#), se recurre a un UAV equipado con un brazo robótico y una cámara instalada con una configuración *eye-in-hand*, para realizar manipulación aérea (sujeción y transporte de objetos). La posición se estima a través de un sistema de captura de movimiento, mientras que la velocidad deseada depende de la información visual proveniente de la cámara.



Figura 5. Helicóptero autónomo con brazo robótico (izq.). UAV con brazo robótico (der.)
Fuente: ajustado de [Kondak et al. \(2018\)](#) y [Jiménez-Cano et al. \(2013\)](#).



Figura 6. UAV realizando manipulación área (izq.). UAV para la inspección de vigas (der.)
Fuente: ajustado de [Chermpayong et al. \(2019\)](#); [Jiménez-Cano et al. \(2017\)](#), y [Kim et al. \(2016\)](#).

El proyecto ARCAS ([Ollero, 2012](#)) fue otro referente que se enfocó en tareas de manipulación y montaje, con cuadricópteros o helicópteros con un brazo de enlace múltiple unido a la parte inferior del robot aéreo. Además se propuso realizar tareas cooperativas entre distintos UAV que sujetaran distintas partes de una estructura y la transportaran, a la respectiva locación del ensamblaje. El problema de planificación cooperativa para el ensamblado de estructuras en el proyecto ARCAS es tratado por [Lallement et al. \(2019\)](#).

En [Muñoz-Morera et al. \(2015\)](#), se asignan tareas de ensamblaje a diversos UAV equipados con brazos robóticos, con el fin de maximizar el paralelismo y cooperación entre ellos, para la construcción de estructuras en lugares donde el acceso es difícil por medios convencionales. Por su parte, [Caraballo et al. \(2017\)](#) sugieren la construcción autónoma de una estructura de celosía con una flota de UAV equipados con brazos robóticos; además de un enfoque distribuido, en el cual se reasigna la tarea si se presenta algún problema con uno de los UAV. Continuando en la misma línea de trabajo cooperativo, [Kim et al. \(2018\)](#) plantean la manipulación de un objeto en forma de vara entre dos UAV dotados con brazos robóticos; a través del diseño de un control descentralizado, un planificador de rutas y un estimador de fuerzas internas en el sistema.



Figura 7. Simulaciones de UAS en el ensamblaje de estructuras

Fuente: ajustado de [Muñoz-Morera et al. \(2015\)](#); [Caraballo et al. \(2017\)](#), y [Felbrich et al. \(2017\)](#).

Si bien hasta el momento se han presentado trabajos en donde el UAV es equipado con un brazo robótico, es pertinente también mencionar el trabajo desarrollado por [Felbrich et al. \(2017\)](#), en el cual se expone una colaboración entre UAV y brazo robótico para la construcción de una estructura tipo voladizo, compuesta de fibra a través de un bobinado de filamento sin núcleo; el UAV se encarga de transportar el material, mientras que el brazo robótico realiza las tareas de colocación y tensado de material.

COOPERACIÓN ENTRE ROBOTS TERRESTRES Y AÉREOS

En esta sección se presenta trabajos de cooperación entre UGV (*unmanned ground vehicle*) y UAS, para tareas autónomas útiles en el sector de la construcción. Se puede manifestar que estos dos sistemas se complementan, ya que la baja capacidad de carga del UAS la compensa el UGV, mientras que el limitado espacio de trabajo del UGV, lo compensa el UAS.

En el trabajo presentado por [Staub et al. \(2018\)](#), se propone emplear un UAV para el levantamiento de barras rígidas que asista tanto a operadores humanos, como a UGV para la manipulación y el desplazamiento de estas, en tareas de ensamblaje y mantenimiento. [Yang et al. \(2018\)](#) describen una extensión de este trabajo, el cual se enfoca en la manipulación de carga con flexibilidad, para objetos largos y delgados, llegando a cancelar las vibraciones producidas en el sistema debido a la manipulación de mencionados objetos. En [Staub et al. \(2018\)](#), se expone una comanipulación aérea-terrestre, para el levantamiento y desplazamiento de una barra de 2,5 m de largo; esto implica intercambio de fuerzas que necesitan ser tratadas con cuidado para evitar inestabilidad en el sistema. Cabe aclarar que, para estos tres trabajos, se emplean brazos robóticos tanto en el UAS, como en el UGV.

Una de las limitantes que se presentan en los UAV es su limitado tiempo, debido a la capacidad energética de sus baterías. [Kiribayashi et al. \(2018\)](#) proponen emplear un micro-UAV accionado por cable (debido a su corto periodo de vuelo), para obtener imágenes desde varias perspectivas, para el operador de una máquina de construcción teleoperada. En [Asadi et al. \(2020\)](#), se presenta un sistema autónomo compuesto por UAV+UGV, para la recolección de información en entornos de construcción desordenados; el UAV sigue la ruta establecida por

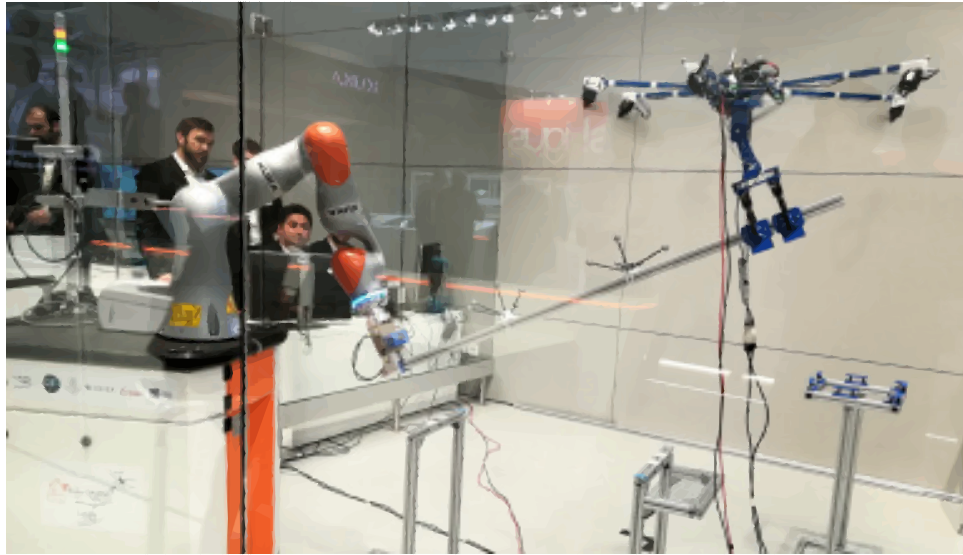


Figura 8. Manipulación de una barra entre un UGV y un UAS

Fuente: tomada de [Staub et al. \(2018\)](#).

el UGV y actúa como un ojo externo para este, mientras que el UGV define su localización a través de una cámara monocular integrada con una IMU.

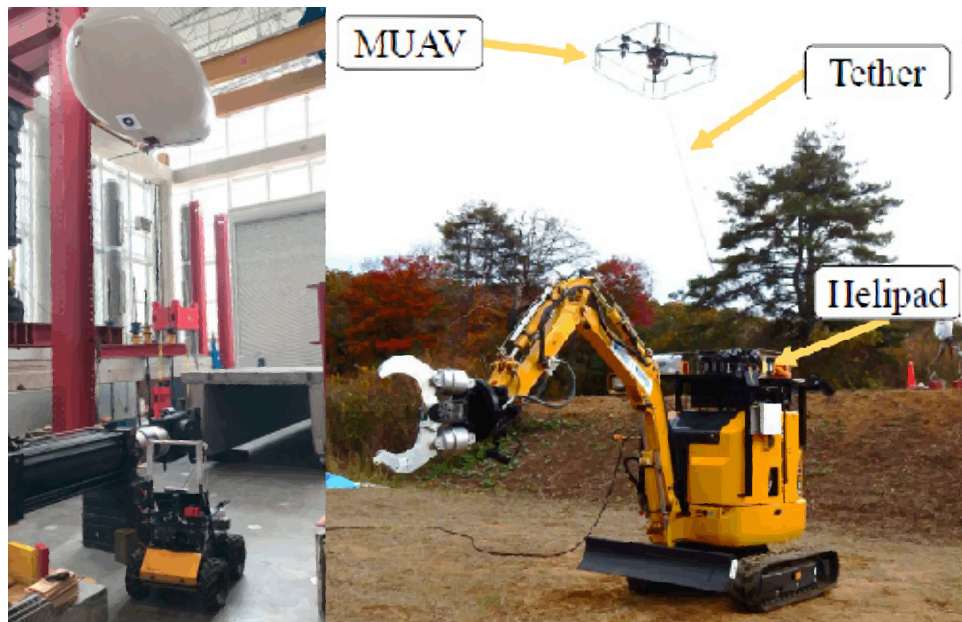


Figura 9. UAV+UGV para la recolección de información en entornos de construcción (izq). Máquina de construcción teleoperada con asistencia de un Micro UAV (der.)

Fuente: ajustado de [Asadi et al. \(2020\)](#) y [Kiribayashi et al. \(2018\)](#).

En [Krizmancic et al. \(2020\)](#), se tiene un sistema cooperativo aéreo-terrestre, para la construcción automatizada de una pared con una estructura predefinida, empleando ladrillos de distintos tamaños y pesos; la tarea es realizada por un UGV y tres UAV en un entorno simulado. Por su parte, [Nguyen et al. \(2019\)](#) presentan un esquema de control para el posicionamiento y orientación de una varilla de carbón, por medio del trabajo colaborativo entre un UGV y un UAV.

CONTROL EN TRANSPORTE DE CARGA PARA UAS

Una de las tareas más requeridas en un entorno de construcción es el transporte de carga entre dos puntos; como ya se había mencionado, una de las limitantes en UAS es precisamente su capacidad de carga; por tanto, se debe pensar en una serie de estrategias que brinden solución a este requerimiento. A continuación se expone brevemente una serie de trabajos al respecto.

En [Tan et al. \(2018\)](#), se plantea un transporte cooperativo de una carga en forma de cuadrado, con cuatro UAV ubicados en cada una de sus esquinas e inclinados hacia el centro de esta, más otro UAV encargado de la estrategia de control centralizado, ubicado en el centro de la carga. Además, la navegación del sistema emplea un escáner láser y SLAM. En [Mellinger et al. \(2013\)](#), se sugiere el control de múltiples cuadricópteros que cooperativamente sujeten, estabilicen y transporten una estructura en madera en una trayectoria tridimensional, para ello se apoyan en un sistema de captura de movimiento para estimar la posición y orientación de cada cuadricóptero. En [Ritz y D'Andrea \(2013\)](#), se transporta un anillo delgado y flexible con seis UAV adjuntos, mediante un sistema de seguimiento de movimiento, para estimar la posición y altitud de cada uno de los UAV.

[Thapa et al. \(2019\)](#) presentan una simulación numérica de un control de fuerza adaptativo descentralizado, para la manipulación y transporte de una carga rígida o flexible; por tanto, sugieren que la masa de cada UAV se adicione a la masa total de la carga, lo que garantiza un empuje proporcional para el levantamiento de la carga.



Figura 10. Trabajo cooperativo entre UAV para el transporte de carga

Fuente: ajustado de [Ritz y D'Andrea \(2013\)](#), [Mellinger et al. \(2013\)](#), y [Tan et al. \(2018\)](#).

[Michael et al. \(2011\)](#) presentan el control de múltiples UAV en las tareas de manipulación y transporte de una carga por medio de cables; así, se asegura su equilibrio estático en una posición deseada, se analiza su estabilidad y se tienen en cuenta las limitantes de la tensión; un sistema de captura de movimiento es utilizado para estimar la localización de los UAV (figura 11). En [Marina et al. \(2019\)](#), se trabaja un sistema compuesto por cuatro UAV, el cual transporta un objeto suspendido dos veces más pesado que la máxima carga para cada uno de los UAV; se emplea un sistema de captura de movimiento, para obtener la localización de los UAV. Por su parte, [Masone et al. \(2016\)](#) plantean utilizar cables para transportar carga con los UAV, en lugar de dotarlos con manipuladores; además de proveer mayor libertad al equipo de UAV; se emplea un algoritmo de distribución de tensión, el cual permite relacionar el movimiento de los UAV con el de la carga; finalmente, la fase de experimentación es llevada a cabo con ocho UAV.

[Tagliabue et al. \(2017\)](#) proponen emplear dos micro-UAV, mientras que [Tagliabue et al. \(2019\)](#) sugieren cinco en un entorno simulado para el transporte colaborativo de un objeto voluminoso, sin tener en cuenta la forma, ni la posición del punto de ajuste. Además, los micro-UAV no necesitan comunicarse entre ellos, debido a sus capacidades sensoriales, y a la utilización de un sistema de navegación visual inercial para la estimación de fuerzas. En [Gassner et al. \(2017\)](#), igualmente se propone el transporte de una carga suspendida empleando dos UAV, sin existir comunicación entre ellos, pero sí teniendo en cuenta pistas inerciales y visuales obtenidas de sus sensores (figura 11). [Tognon et al. \(2018\)](#) trabajan una manipulación cooperativa descentralizada de una carga suspendida por cables, empleando dos UAV sin comunicación explícita; se presenta una arquitectura maestro-esclavo y se tienen en cuenta las fuerzas generadas en los cables para el control del sistema.



Figura 11. Transporte de carga suspendida por medio de UAV

Fuente: ajustado de [Michael et al. \(2011\)](#), [Tagliabue et al. \(2017\)](#), y [Gassner et al. \(2017\)](#).

Por su parte, [Sanalidro et al. \(2020\)](#) exponen la necesidad de controlar la posición y orientación de la carga en tareas de ensamblado o construcción con UAS, así como de tener una alta precisión y compensar las perturbaciones externas. Para ello emplean tres UAV conectados cada uno a un par de cables y un sistema de captura de movimiento; el sistema está en la capacidad de realizar trayectorias donde la plataforma se traslade y oriente en distintas direcciones. La maniobra para el levantamiento de carga suspendida recibe atención en [Cruz y](#)

Fierro (2017), donde se presenta una metodología compuesta por tres estados (configurar, tirar y levantar), la cual permite generar una trayectoria para llevar a cabo la tarea propuesta.

Hasta el momento se han presentado trabajos donde la carga a transportar es sujeta por los UAV, ya sea de forma manual o con *grippers*; sin embargo, en Gabrich *et al.* (2018), se propone una plataforma modular aérea, compuesta por cuatro cuadricópteros, capaz de sujetar y transportar objetos, descentralizando el control de apertura y orientación en cada uno de los UAV.



Figura 12. Flying gripper transportando una taza de café

Fuente: tomado de Gabrich *et al.* (2018).

CONCLUSIONES

Los UAV han venido integrándose exitosamente al sector de la construcción en los últimos años; sin embargo, la gran mayoría de tareas (monitoreo, inspección, levantamiento de datos, topografía, etc.) que desempeñan actualmente son teleoperadas. Desde los centros de investigación, se ha avanzado en hacer que los robots aéreos sean más autónomos, para ello se ha recurrido a sensores que brinden mayor información del entorno, modelos matemáticos más robustos, técnicas de control avanzado y algoritmos de inteligencia artificial.

En el presente trabajo se observa que los UAV no solo son capaces de ejecutar las tareas mencionadas previamente, sino que además pueden llevar a cabo labores donde interactúan directamente con los elementos de la construcción, por ejemplo, levantamiento, transporte y posicionamiento de carga. Al observar que una de las limitantes para los UAV es la baja capacidad de carga, se presentan trabajos cooperativos entre los mismos UAV o, incluso, con plata-

formas robóticas móviles y brazos robóticos, para que así se distribuya la fuerza requerida en la tarea.

El transporte de carga cooperativo en UAS es una tarea que exige la coordinación de todos los agentes que participan en ella; por consiguiente, uno de los campos que mayor atención ha tenido en los últimos años para este tipo de tareas con estos sistemas son los algoritmos de control. Si bien, inicialmente, se emplearon y aún se emplean sensores que brindan información suficiente para poder controlar los UAS en un entorno confinado, en un entorno real o abierto, estos mismos sensores no pueden emplearse; razón por la cual se han venido desarrollando modelos matemáticos robustos que ofrezcan una cooperación entre UAV sin la necesidad de contar con sensores externos a ellos.

Al tener un entorno dinámico como lo es el de la construcción, se propone trabajar en UAS que reconozcan obstáculos, no solo estáticos, sino también dinámicos; esto generará una mayor colaboración con el ser humano. Además, se deben tener en cuenta las condiciones ambientales y el polvo característico que se encuentra en este medio. Sensores como cámaras, lidar, infrarrojos, entre otros, pueden ayudar a ello.

Las tareas de reparación es otro campo por explotar a partir de robots aéreos trabajando en el sector de la construcción; la precisión y estabilidad del sistema son características relevantes al realizar este tipo de tareas; por consiguiente, técnicas de visión por computador, control e inteligencia artificial, han de ser tenidas en cuenta para dar solución a las necesidades que se manifiestan.

Con respecto a la cooperación robótica en el entorno de la construcción, no solo se debe seguir trabajando en sistemas autónomos compuestos por robots aéreos y terrestres, sino que también se debe pensar en generar redes de comunicación que permitan al sistema conocer el estado de cada uno de los agentes participantes, así como el avance de la obra.

REFERENCIAS

- Agarwal, R., Chandrasekaran, S. y Sridhar, M. (2016). *Imagining construction's digital future*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future#>. ↑Ver página 14
- Asadi, K., Suresh, A., Ender, A., Gotad, S., Maniyar, S., Anand, S., Noghabaei, M., Han, K., Lobaton, E. y Wu, T. (2020). An integrated UGV-UAV system for construction site data collection. *Automation in Construction*, 112, 103068. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103068>. ↑Ver página 20, 21
- Augugliaro, F., Zarfati, E., Mirjan, A. y D'Andrea, R. (2015). Knot-tying with flying machines for aerial construction. En *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and*

Systems (IROS) (pp. 5917-5922). <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7354218>. ↑Ver página 15

Augugliaro, F., Mirjan, A., Gramazio, F., Kohler, M. y D'Andrea, R. (2013). Building tensile structures with flying machines. En *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3487-3492). <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696853>. ↑Ver página 15, 17

Augugliaro, F., Lupashin, S., Hamer, M., Male, C., Hehn, M., Mueller, M. W., Willmann, J. S., Gramazio, F., Kohler, M. y D'Andrea, R. (2014). The flight assembled architecture installation: Cooperative construction with flying machines. *IEEE Control Systems Magazine*, 34, 4, 46-64. <https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2320359>. ↑Ver página 15

Becerra, Y. A. (2020). Una revisión de plataformas robóticas para el sector de la construcción. *Tecnura*, 24(63), 115-132. <https://doi.org/10.14483/22487638.15384>. ↑Ver página 14

Becerra, Y. A. y Arbulú, M. R. (2022). Uso de robótica en una emergencia sanitaria. *Tecnura*, 26(73), 130-141. <https://doi.org/10.14483/22487638.17320>. ↑Ver página 14

Caraballo, L. E., Díaz-Báñez, J. M., Maza, I. y Ollero, A. (2017). The block-information-sharing strategy for task allocation: A case study for structure assembly with aerial robots. *European Journal of Operational Research*, 260(2), 725-738. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.049>. ↑Ver página 19, 20

Chermprayong, P., Zhang, K., Xiao, F. y Kovac, M. (2019). An integrated delta manipulator for aerial repair: A new aerial robotic system. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26, 1, 54-66. <https://doi.org/10.1109/MRA.2018.2888911>. ↑Ver página 18, 19

Cruz, P. J. y Fierro, R. (2017). Cable-suspended load lifting by a quadrotor UAV: Hybrid model, trajectory generation, and control. *Autonomous Robots*, 41, 1629-1643. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9632-2>. ↑Ver página 23

Felbrich, B., Frueh, N., Prado, M., Saffarian, S., Solly, J., Vasey, L., Knippers, J. y Menges, A. (2017). Multi-machine fabrication: An integrative design process utilising an autonomous UAV and industrial robots for the fabrication of long span composite structures. En *Disciplines & Disruption, ACADIA (Association for Computer Aided Design in Architecture)* (pp. 248-259). MIT. <http://doi.org/10.5281/zenodo.2667782>. ↑Ver página 20

Gabrich, B., Saldaña, D., Kumar, V. y Yim, M. (2018). A flying gripper based on cuboid modular robots. En *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 7024-7030). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460682>. ↑Ver página 24

- Gassner, M., Cieslewski, T. y Scaramuzza, D. (2017). Dynamic collaboration without communication: Vision-based cable-suspended load transport with two quadrotors. En *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5196-5202). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989609>. ↑Ver página 23
- Goessens, S., De Furstenberg, T., Manderlier, C., Mueller, C. y Latteur, P. (2017). A few aspects of timber UAV-based Construction. En *Interfaces: Architecture, Engineering, Science (IASS) Annual Symposium*. Hamburgo, Alemania. ↑Ver página 17
- Goessens, S., Mueller, C. y Latteur, P. (2018). Feasibility study for drone-based masonry construction of real-scale structures. *Automation in Construction*, 94, 458-480. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.015>. ↑Ver página 18
- Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, P. A. y Kovac, M. (2014). 3D printing with flying robots. En *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4493-4499). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907515>. ↑Ver página 17, 18
- Jiménez-Cano, A. E., Heredia, G. y Ollero, A. (2017). Aerial manipulator with a compliant arm for bridge inspection. En *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1217-1222). <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991458>. ↑Ver página 18, 19
- Jiménez-Cano, A. E., Martin, J., Heredia, G., Ollero, A. y Cano, R. (2013). Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks. En *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4916-4921). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631279>. ↑Ver página 18, 19
- Kim, S., Seo, H., Choi, S. y Kim, H. J. (2016). Vision-guided aerial manipulation using a multirotor with a robotic arm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(4), 1912-1923. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2523602>. ↑Ver página 18, 19
- Kim, S., Seo, H., Shin, J. y Kim, H. J. (2018). Cooperative aerial manipulation using multirotors with multi-DOF robotic arms. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(2), 702-713. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2792318>. ↑Ver página 19
- Kiribayashi, S., Yakushigawa, K. y Nagatani, K. (2018). *Design and Development of Tether-Powered Multirotor Micro Unmanned Aerial Vehicle System for Remote-Controlled Construction Machine*. En M. Hutter y R. Siegwart (eds.), *Field and service robotics* (pp. 637-648). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_41. ↑Ver página 20, 21
- Kondak, K., Huber, F., Schwarzbach, M., Laiacker, M., Sommer, D., Bejar, M. y Ollero, A. (2014). Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of free-

- dom industrial manipulator. En *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 2107-2112). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907148>. ↑Ver página 18, 19
- Krizmancic, M., Arbanas, B., Petrovic, T., Petric, F. y Bogdan, S. (2020). Cooperative aerial-ground multi-robot system for automated construction tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 798-805. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2965855>. ↑Ver página 22
- Lallement, R., Cortés, J., Gharbi, M., Boeuf, A., Alami, R., Fernandez-Aguera, C. J. y Maza, I. (2019). Combining assembly planning and geometric task planning. En A. Ollero y B. Siciliano (eds.), *Aerial robotic manipulation* (pp. 299-316). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12945-3_22. ↑Ver página 19
- Lindsey, Q. y Kumar, V. (2013). Distributed construction of truss structures. En E. Frazzoli, T. Lozano-Pérez, N. Roy y D. Rus (eds.), *Algorithmic foundations of robotics X* (pp. 209-225). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36279-8_13. ↑Ver página 15, 17
- Lindsey, Q., Mellinger, D. y Kumar, V. (2011). Construction of cubic structures with quadrotor teams. En H. Durrant-Whyte, N. Roy y P. Abbeel (eds.). *Robotics: Science and systems VII* (pp. 177-184). MIT Press. ↑Ver página 15, 17
- Marina, H. G. y Smeur, E. (2019). Flexible collaborative transportation by a team of rotorcraft. En *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1074-1080). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794316>. ↑Ver página 23
- Masone, C., Bühlhoff, H. H. y Stegagno, P. (2016). Cooperative transportation of a payload using quadrotors: A reconfigurable cable-driven parallel robot. En *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 1623-1630). <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759262>. ↑Ver página 23
- Maxim, A., Lerke, O., Prado, M., Dorstelmann, M., Menges, A. y Schwieger, V. (2017). UAV Guidance with robotic total station for architectural fabrication processes. En A. Hassan (ed.), *Unmanned aerial vehicles 2017* (pp. 145-161). Wißner-Verlag. ↑Ver página 17
- Mellinger, D., Shomin, M., Michael, N. y Kumar, V. (2013). Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors. En A. Martinoli *et al.* (eds.), *Distributed autonomous robotic systems* (pp. 545-558). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32723-0_39. ↑Ver página 22
- Michael, N., Fink, J. y Kumar, V. (2011). Cooperative manipulation and transportation with aerial robots. *Autonomous Robots – AROBOTS*, 30, 73-86. <https://doi.org/10.1007/s10514-010-9205-0>. ↑Ver página 22, 23

- Mirjan, A., Gramazio, F., Kohler, M., Augugliaro, F. y D'Andrea, R. (2013). Architectural fabrication of tensile structures with flying machines. En T. Ferreira (eds), *Green design, materials and manufacturing processes* (pp. 513-518). CRC Press. ↑Ver página 15, 17
- Mirjan, A., Augugliaro, F., D'Andrea, R., Gramazio, F. y Kohler, M. (2016). Building a Bridge with Flying Robots. En D. Reinhardt, R. Saunders y J. Burry (eds.), *Robotic fabrication in architecture, art and design 2016* (pp. 34-47). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_3. ↑Ver página 15, 17
- Muñoz-Morera, J., Maza, I., Fernández-Aguera, C.J., Caballero, F. y Ollero, A. (2015). Assembly planning for the construction of structures with multiple UAS equipped with robotic arms. En *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1049-1058). <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2015.7152396>. ↑Ver página 19, 20
- Nguyen, T., Catoire, L. y Garone, E. (2019). Control of a quadrotor and a ground vehicle manipulating an object. *Automatica*, 105, 384-390. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.04.011>. ↑Ver página 22
- Ollero, A. (11 de octubre de 2012). *Aerial robotics cooperative assembly system (ARCAS): First results. Aerial Physically Acting Robots (AIRPHARO)* [Workshop]. International Conference on Robotics (IROS), Vilamoura, Portugal. ↑Ver página 19
- OxfordEconomics.com. (2021). *Future of construction: A global forecast for construction to 2030*. <https://www.oxfordeconomics.com/resource/future-of-construction/>. ↑Ver página 14
- Pietri, S. y Erioli, A. (2017). Fibrous aerial robotics. En *35th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe/Design Tools – Robotics*, 1, 689-698). ↑Ver página 17
- Ritz, R. y D'Andrea, R. (2013). Carrying a flexible payload with multiple flying vehicles. En *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3465-3471). <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696850>. ↑Ver página 22
- Sanalidro, D., Savino, H. J., Tognon, M., Cortés, J. y Franchi, A. (2020). Full-pose manipulation control of a cable-suspended load with multiple UAVs under uncertainties. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2185-2191. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2969930>. ↑Ver página 23
- Staub, N., Bicego, D., Sablé, Q., Arellano-Quintana, V., Mishra, S. y Franchi, A. (2018). Towards a flying assistant paradigm: The OTHex. En *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 6997-7002). <http://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460877>. ↑Ver página 20, 21

- Staub, N., Mohammadi, M., Bicego, D., Delamare, Q., Yang, H., Prattichizzo, D., Giordano, P. R., Lee, D. y Franchi, A. (2018). The Tele-MAGMaS: An aerial-ground comanipulator system. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 25(4), 66-75. <http://doi.org/10.1109/MRA.2018.2871344>. ↑Ver página 20, 21
- Tagliabue, A., Kamel, M., Verling, S., Siegwart, R. y Nieto, J. (2017). Collaborative transportation using MAVs via passive force control. En *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5766-5773). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989678>. ↑Ver página 23
- Tagliabue, A., Kamel, S., Siegwart, R. y Nieto, J. (2019). Robust collaborative object transportation using multiple MAVs. *The International Journal of Robotics Research*, 38(9), 1020-1044. <https://doi.org/10.1177/0278364919854131>. ↑Ver página 23
- Tan, Y. H., Lai, S., Wang, K. y Chen, B.M. (2018). Cooperative control of multiple unmanned aerial systems for heavy duty carrying. *Annual Review in Control*, 46, 44-57. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.07.001>. ↑Ver página 22
- Thapa, S., Bai, H. y Acosta, J. A. (2019). Cooperative aerial manipulation with decentralized adaptive force-consensus control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 97, 171-183. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01048-4>. ↑Ver página 22
- Tognon, M., Gabellieri, C., Pallottino, L. y Franchi, A. (2018). Aerial co-manipulation with cables: The role of internal force for equilibria, stability, and passivity. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 2577-2583. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2803811>. ↑Ver página 23
- Willmann, J., Augugliaro, F., Cadalbert, T., D'Andrea, R., Gramazio, F. y Kohler, M. (2012). Aerial robotic construction towards a new field of architectural research. *International Journal of Architectural Computing*, 10(3), 439-459. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.10.3.439>. ↑Ver página 15, 16
- Yang, H., Staub, N., Franchi, A. y Lee, D. (2018). Modeling and control of multiple aerial-ground manipulator system (MAGMaS) with load flexibility. En *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 1-8). <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593834>. ↑Ver página 20



Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá

Operational evaluation of BRT corridor using microscopic simulation on 68' avenue corridor at Bogotá city

Kelly Andrea Rodríguez Polo ¹, Luis Ángel Moreno Anselmi ² Carlos Andrés Gaviria Mendoza ³ Miguel Ángel Ospina García ⁴

Fecha de Recepción: 10 de marzo de 2021

Fecha de Aceptación: 18 de julio de 2022

Cómo citar: Rodríguez-Polo, K. A., Moreno-Anselmi, L. A., Gaviria-Mendoza, C. A., Ospina-García, M. A. (2023). Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá. *Tecnura*, 27(76), 31-53. <https://doi.org/10.14483/22487638.17741>

Resumen

Contexto: Para solucionar la problemática del transporte público de pasajeros que existía en la ciudad de Bogotá, para el año 2001 inició a operar un sistema de transporte basado en buses de tránsito rápido (BRT, por su sigla en inglés) llamado TransMilenio, que fue construido sobre algunos corredores viales de la ciudad, como la avenida Caracas, Autopista Norte, entre otras. La avenida 68 es una ruta esencial que conecta el suroriente con el noroccidente de Bogotá y forma parte de las etapas donde se adelanta la implementación de correderos para el BRT.

Métodología: En el presente estudio se evaluó un kilómetro de esta avenida, donde se encuentra un tramo crítico de la proyección del futuro BRT que contiene tres intersecciones semaforizadas en la actualidad. Para la zona de estudio, se evalúa una secuencia de etapas que inicia con la instalación de carril exclusivo del BRT en la línea central de la avenida 68 sobre los actuales carriles rápidos en cada sentido del flujo vehicular; posteriormente, la construcción de una glorieta en la intersección con la avenida Suba, y finalmente, la adición de carriles para los vehículos mixtos en el mediano y largo plazo. Para esto se plantea un modelo calibrado en la herramienta VISSIM con los datos de volúmenes aforados en la zona, la composición vehicular y el reporte de velocidades.

Resultados: Mediante la implementación gradual de las modificaciones propuestas se logra mejorar la condición operacional del tramo (incremento de la velocidad promedio de 17 km/h a 35 km/h) que se sostiene en el periodo de estudio.

Conclusiones: La solución permanente a la movilidad requiere la construcción de carriles adicionales para el tránsito mixto que logra una condición operacional similar a las del BRT, y donde la velocidad de operación promedio

¹Ingeniera civil, magíster en Ingeniería. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: kellypolo2012@gmail.com

²Ingeniero civil, magíster en Ingeniería, candidato a doctor de la Universidade de Brasília. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: luis.moreno@unimilitar.edu.co

³Ingeniero civil, magíster en Ingeniería, doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: carlos.gaviria@unimilitar.edu.co

⁴Ingeniero civil, magíster en Construcción. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: miguel.ospina@unimilitar.edu.co

del TransMilenio es de 38 km/h en todo el periodo de estudio y a veinte años.

Palabras clave: buses de tránsito rápido, modelo de seguimiento estocástico, microsimulación, segmentos de vía, intersecciones, VISSIM.

Abstract

Context: In order to solve the problem of public passenger transportation that existed in the city of Bogotá, in 2001 a Bus Rapid Transit (BRT) system called TransMilenio began to operate, which was built on some of the city's road corridors, such as Caracas Avenue and Autopista Norte, among others. Av. 68 is an essential route that connects the southeast with the northwest of Bogotá and is part of the stages where the implementation of BRT corridors is underway.

Methodology: In this study, one kilometer of this avenue was evaluated, where a critical section of the future BRT projection is located, containing three traffic signalized intersections at present. A sequence of stages is proposed and evaluated in the area studied, starting with the installation of an exclusive BRT lane on the center line of Av. 68 on the existing express lanes in each direction of the vehicular route, next the construction of a roundabout at the intersection with Av. Suba and finally, the addition of mixed vehicle lanes. Evaluations are carried out by using calibrated model in the VISSIM software with the volume, vehicle composition and velocity data collected.

Results: The results show that the gradual implementation of the proposed modification improves the operational condition of the roadway segment (average speed increases from 17 to 35 km/h) and is sustained throughout the study period.

Conclusions: The permanent transport solution requires the construction of additional mixed traffic lanes to maintain the operational status of mixed traffic. and where the average operating speed of the Transmilenio is 38 km/h over the entire study period and 20 years.

Keywords: Bus Rapid transit, stochastic tracking model, microsimulation, Roadway Segments, Intersections, VISSIM.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	33
Microsimulación: una revisión	34
Intersecciones semaforizadas	35
Glorietas	35
Pasos a desnivel	36
Microsimulación de corredores del BRT	36
Segmento seleccionado para el estudio	36
Metodología	39
Situación actual	40
Propuesta etapa I: situación actual con la adición del BRT	42
Propuesta etapa II: adición de glorieta en cinco años	42
Propuesta etapa III: adición de carril para vehículos mixtos en diez años	43

Propuesta etapa IV: adición de segundo carril para vehículos mixtos en quince años	44
Proyección final a veinte años	44
Resultados	44
Conclusiones	47
Agradecimientos	48
Referencias	48

INTRODUCCIÓN

Existe una necesidad latente de las grandes ciudades de incluir sistemas de transporte público que satisfagan las necesidades de sus habitantes. Un gran número de urbes han empezado a planear y desarrollar su sistema de transporte basado en buses de tránsito rápido (BRT, por su sigla en inglés) como solución permanente para la creciente demanda de transporte masivo de pasajeros (Hook, 2005). Este sistema ofrece capacidad moderada, y demanda un mínimo de capital en comparación con otras formas de transporte que ha propiciado su implementación en países como India, Brasil, Indonesia, etc. Además, ha demostrado ser sostenible para satisfacer los requerimientos de un sistema de transporte masivo (Chepuri *et al.* (2015), Hook, 2005, Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, 2019) y acorde con el crecimiento poblacional de las ciudades (Rangarajan, 2010).

Dentro de la estructura organizacional de las ciudades, o centros poblados, se encuentra el sistema de transporte que involucra las zonas urbanas y las rurales que las rodean (Lizárraga-Mollinedo, 2006). En este sentido, las dinámicas de crecimiento y expansión de la población demandan unos planes de transporte público que presenten una forma operacional a las condiciones del entorno y factible desde lo económico (Monzón *et al.*, 2013).

Sin embargo, en la ciudad capital de Colombia, los problemas de congestión vehicular se asocian principalmente a una poca planeación por parte de la administración, al diseño inadecuado de los corredores viales y su sobresaturación, por el aumento no controlado del parque automotor, en vehículos particulares y públicos (Chaparro, 2020), derivado de las dinámicas de expansión de las ciudades (incremento económico, geográfico y demográfico). Por ejemplo, el problema de movilidad en el municipio de Cachipay (Colombia) ha producido un aumento mínimo de un 46 % en la circulación vehicular por sus calles (Espinel-Duarte *et al.*, 2018). Esta situación es más severa al considerar que Bogotá presenta zonas críticas en niveles de contaminación del aire ubicados en el norte y sur de ciudad (Carmona-Aparicio *et al.*, 2016). A esto se suma el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un sistema de transporte público en decadencia, y que circula debido al bajo rendimiento promedio del combustible durante las horas más congestionadas (Serafín-González, 2019). A pesar de que un

sistema de BRT representa una solución equilibrada desde la sostenibilidad, la documentación de las experiencias de puesta en uso, por ejemplo, desde el punto de vista operacional o económico, es escasa; en consecuencia, los análisis detallados de las mejores operaciones para la implementación del BRT aún son limitadas (Duduta *et al.*, 2012, Siddique y Khan, 2006).

El BRT de Bogotá, denominado TransMilenio, ha desarrollado tres de sus ocho fases, y continuará con la construcción del corredor sobre la avenida 68, que comunica a Bogotá de suroccidente a noroccidente (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2019). Sin embargo, en algunas de sus intersecciones, como las localizadas entre la calle 98 y la avenida Suba, presenta altos niveles de congestión vehicular, reflejado en un incremento de la longitud de las colas, bajas velocidades de operación bajas y elevados tiempos de viaje en la zona (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014).

La extensión de TransMilenio a través de nuevos corredores de tránsito masivo será de beneficio en los próximos años (Bocarejo, J. P. y Urrego, 2020, Cortés *et al.*, 2020) y es imperativo para el desarrollo de la ciudad. Por tanto, mediante la técnica de microsimulación se estiman las características operacionales de un tramo de 1,0 km que se considera uno de los más críticos del nuevo corredor (avenida 68) del BRT de la capital. Se inicia con una descripción del BRT de Bogotá, la zona de estudio y la metodología usada. Posteriormente se presentan los escenarios seleccionados, a partir de los pasos metodológicos del diseño de intersecciones del *Manual de diseño de carreteras* (Ministerio de Transporte, 2008). A partir de los aforos vehiculares en campo se determina la capacidad actual de la intersección, volúmenes, composición vehicular, y recorridos que se realizan en la intersección. Estos datos se usaron para modelar y calibrar la situación actual mediante el programa VISSIM (*Verkehr In Städten - SIMulation*). Posteriormente se discuten los resultados de las alternativas de modificación del tramo de estudio, las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis.

Microsimulación: una revisión

Variedad de herramientas computacionales son usadas para la modelación de corredores a través de modelos analíticos, empíricos o de simulación estocástica (D'Ambrogio *et al.*, 2009). En particular, uno de los modelos de seguimiento estocástico y velocidades dinámicas más usado para realizar las simulaciones se encuentra disponible en la herramienta VISSIM (*Verkehr In Städten - SIMulation*) (Casares, A. y Galarraga, 2015). Este *software* de microsimulación permite estudiar una porción de la red vial bajo las diferentes intervenciones que se deseen evaluar y predecir los indicadores de tránsito más importantes (Rivera *et al.*, 2011). Además, la microsimulación es la herramienta sugerida para determinar las soluciones más óptimas (Godavarthi *et al.*, 2014), pues ha sido utilizado para caracterizar variedad de comportamiento de los conductores, como los cuellos de botella y otros problemas de tráfico (Raju *et al.*, 2017) y puede ser aplicado en la operación de autopistas, redes urbanas con altos niveles de congestión, análisis

de emisiones y estimar variaciones en los tiempos de retraso y capacidad de una sección de vía (Ratrouy Rahman, 2009). A continuación, se resumen los principales enfoques y conclusiones expuestas por especialistas internacionales más significativas sobre soluciones de tráfico mediante microsimulación.

Intersecciones semaforizadas

Chepuri *et al.* (2015), y Chepuri *et al.* (2018) evaluaron los tiempos de retraso en el tráfico causado por cuatro intersecciones en 1,8 km del corredor del BRT en la ciudad de Surat (India), a través de microsimulación en el software VISSIM. Se encontró que incrementar los tiempos en verde hasta 140 s en la dirección de mayor congestión puede reducir significativamente los tiempos de viaje (hasta 266 s).

Raju *et al.* (2020) estudian la eficiencia en el flujo de tráfico en la intersección semaforizada más congestionada del BRT en la misma ciudad a través de microsimulación. Los escenarios incluyeron el diseño de dos, tres y cuatro fases de control semafórico en la que se demuestra que un control de tres fases es adecuado para estos casos.

Ni *et al.* (2020) analizaron los retrasos en las intersecciones dotadas con semáforos del BRT en Taichung (Taiwan) y mediante un sistema de control pasivo con prioridad, las microsimulaciones mostraron que se puede reducir en un 22 % los tiempos de retrasos del BRT sin afectar el nivel de servicio del tráfico total de la zona, y se incrementa la capacidad de este sistema de transporte.

Glorietas

El uso de glorietas puede mejorar todos los indicadores de tránsito en una intersección urbana (Ipus-Gaviria *et al.*, 2016). Aakre y Aakre (2017) estudian glorietas con carril continuo central de uso exclusivo del BRT que pasa a través de la isla central. Mediante control de tráfico de dos fases se controló el conflicto entre el BRT y los demás vehículos que usan la glorieta. Según los resultados, la microsimulación muestra que este tipo de configuraciones con semáforos pueden inducir importantes reducciones en los retrasos (cero retrasos en BRT y reducción en los demás vehículos) y emisiones del sistema de transporte.

Por su parte, Kawanzi y Benon (2018) en un estudio en Kampala (Uganda), donde las intersecciones operan en condición saturada, se determinó que la implementación de semáforos en las glorietas incrementa la longitud de cola y aumenta los retrasos debido a que se altera el balance en el flujo del tráfico de la glorieta sin señalización.

Pasos a desnivel

Los pasos a desnivel generalmente son la solución más eficiente para una intersección en cuanto a indicadores de tránsito (Ipus-Gaviria *et al.*, 2016, Rincón-Numpaque *et al.*, 2020). Ipus Gaviria *et al.* (2016) evaluaron tres intersecciones urbanas en la ciudad de Montería (Colombia) mediante microsimulación con el *software Aimsun*. Los resultados permitieron identificar que la solución definitiva es la construcción de deprimidos que reducen a un 30 % los tiempos de viaje en cada una de las intersecciones.

Rincón-Numpaque *et al.*, 2020 estudiaron las alternativas de solución a la movilidad para una intersección tipo glorieta que se encuentra operando por encima de su capacidad en la ciudad de Tunja (Colombia). Como resultado, se determinó que los pasos a desnivel permiten incrementar en cerca de cuatro veces la velocidad de circulación actual y mantiene velocidades aceptables en los siguientes veinte años (18,7 km/h).

Microsimulación de corredores del BRT

Las técnicas de simulación microscópica han sido aplicadas para estudiar los corredores del BRT en los últimos años (Chepuri *et al.* (2018), Godavarthi *et al.*, 2014). Siddique y Khan, 2006 estudiaron la capacidad ante altos volúmenes de tránsito en los corredores del BRT de la ciudad de Ottawa (Canadá) mediante el *software* de microsimulación *NETSIM*. Se encontró que la capacidad arrojada fue entre 22 % y 55 % mayores que las estimadas en el Manual de capacidad de carreteras (HCM por sus siglas en inglés).

Por otra parte, Ancora *et al.* (2012) buscaron desarrollar un nuevo modelo de microsimulación llamado *TRANSIMT* para integrar la infraestructura, vehículos, configuración de paraderos, estrategias de controles semafóricos y pasajeros, en el análisis que fue empleado para evaluar el desempeño de los corredores del BRT en Roma y que puede ser ajustado a implementaciones del BRT en otras regiones para la configuración de servicio que se ofrezca en dicha zona.

Zheng *et al.* (2020) diseñaron una estrategia de control dinámica para compartir el carril exclusivo del BRT con el tráfico mixto, sin perjudicar su operación con vehículos con tecnología de conectividad integrada, que fue simulado sobre un tramo de BRT en Chengdu (China). En este caso se evaluaron las condiciones de operación libre y sobresaturado; en esta última condición se encontró que los tiempos de espera de los vehículos mixtos pueden ser reducidos sin afectar la operación habitual del BRT.

Segmento seleccionado para el estudio

El sistema de BRT para la capital está planeado sobre las vías arterias (Muñoz González, 2011) en ocho (VIII) fases para alcanzar sus metas de cobertura; actualmente ha puesto en operación las primeras tres (III) etapas compuestas por 114,4 km distribuidos en 11 corredores

(figura 1, línea negra) y 139 estaciones monitoreadas por una estructura de control centralizada (Cortés, 2016, Rodríguez-Polo y Henao-Pérez, 2018). Este sistema, a 2021, reportó una demanda de 34 001 175 pasajeros diarios y una velocidad límite de 60 km/h en los corredores (Global BRT Data, 2020).

Los corredores se encuentran en la categoría oro (más alta de la escala), de acuerdo con la escala adaptada por el Instituto de Transportación y Desarrollo de Políticas (ITDP, por su sigla en inglés). Esta categoría considera que los corredores existentes alcanzan los mejores niveles de desempeño operacional y de eficiencia mientras se provee una alta calidad en el servicio (Instituto de Transportación y Desarrollo de Políticas (ITDP), 2016). El corredor de la avenida carrera 68 forma parte de la siguiente fase a construir, se proyecta que estará disponible para 2025, y cubrirá el sector comprendido entre la autopista Sur y la calle 100 con carrera 7 (una distancia de 17 kilómetros). Sin embargo, en la sección vial de la calle 98 y la avenida Suba (figura 1, línea azul) durante los periodos de máxima demanda se tiene una elevada congestión vehicular, por ser una de las centralidades de la malla vial que brinda acceso a las localidades de Suba, Usaquén, Barrios Unidos y Chapinero, y de conectar con el mayor centro de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014). En consecuencia, se requiere estudiar las alternativas integrales en esta zona del este nuevo corredor del BRT que inicia por estudiar la condición actual, registrar su geometría y acudir a los reportes existentes (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2020), con la finalidad de determinar las soluciones más viables para la adecuada movilidad en este sector.

El tramo de estudio tiene una longitud aproximada de 1,0 km que, en su mayor extensión, está desarrollado sobre una curva horizontal de 1020 m de radio, una pendiente longitudinal del 1 %, dotada de cuatro intersecciones (calle 98, carrera 68A, carrera 64 y av. Suba) con semáforos y sin pasos elevados o deprimidos (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2019). En la figura 2 se muestra el tramo investigado junto con las direcciones de tráfico en la intersección mediante flechas rojas (ingreso) y verdes (salidas).

La avenida carrera 68 es una vía arterial tipo V-2, de acuerdo con las categorías actuales (Ministerio de Transporte, 2008). La sección transversal entre la calle 98 y la avenida Suba consta de un ancho vial de 44,0 m conformado por: a) cuatro calzadas unidireccionales de ancho 7,0 m (dos por sentido de flujo, es decir, un carril lento más uno rápido); b) separadores externos entre carriles en el mismo sentido de 3,0 m, y c) un separador central de hasta 10,0 m. En particular, en las intersecciones con la carrera 68A y la avenida Suba, el separador central se reduce debido al retorno al sur y el carril de giro a la izquierda, respectivamente (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2020). El carril lento aloja tráfico mixto, incluidas rutas de transporte público colectivo, mientras que en el carril rápido transitan los vehículos particulares.

Se realizó un aforo manual por conteo directo en las cuatro intersecciones mediante el aforo de cada una de las entradas y salidas de estas, de manera simultánea. Para determinar la hora de máxima demanda (HDM, por sus siglas en inglés) se sumaron los volúmenes de todas las intersecciones con la finalidad de identificar la tendencia de todo el tramo de estudio.

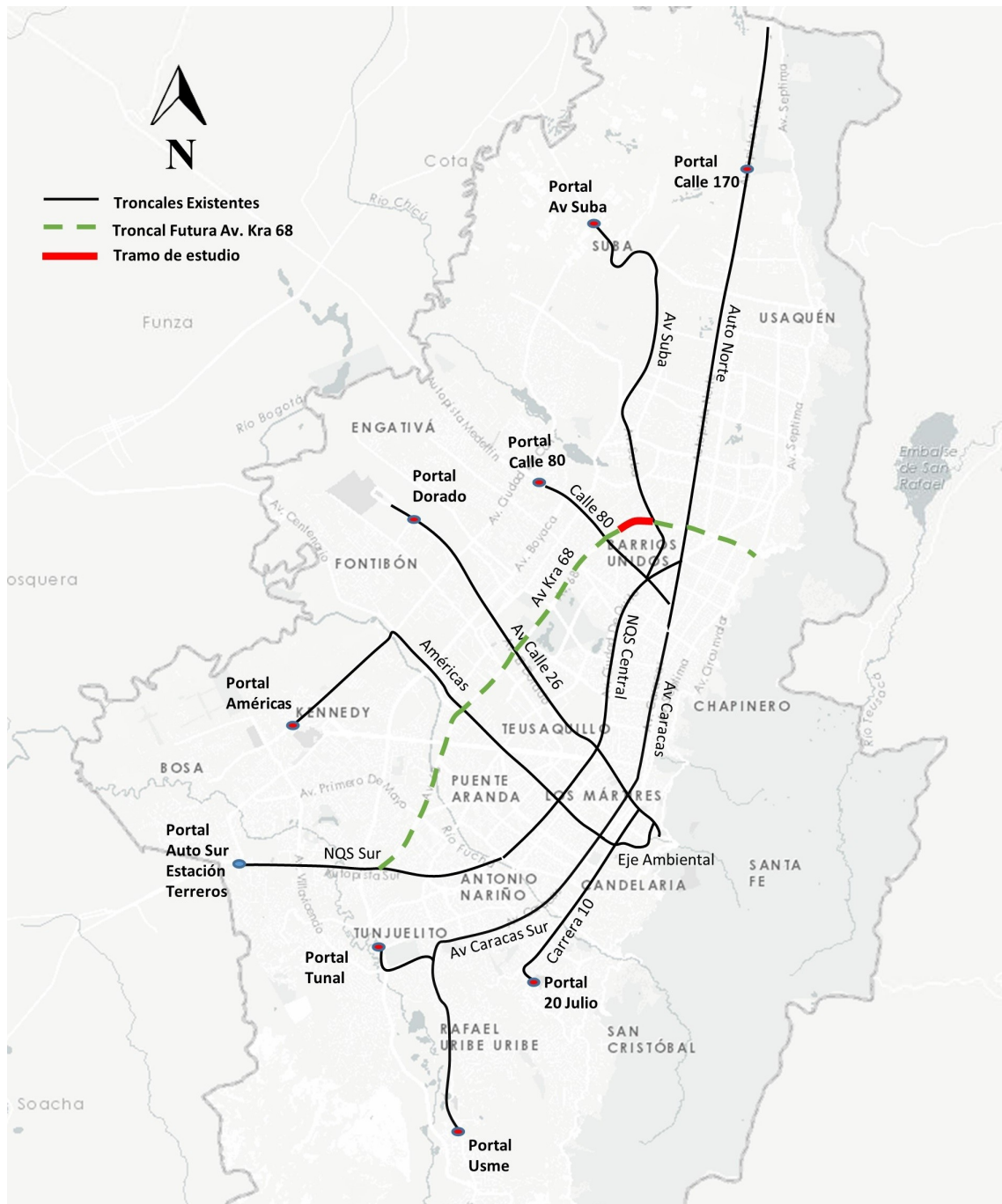


Figura 1. Red de troncales del BRT de Bogotá

Fuente: adaptado de (Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, 2019).

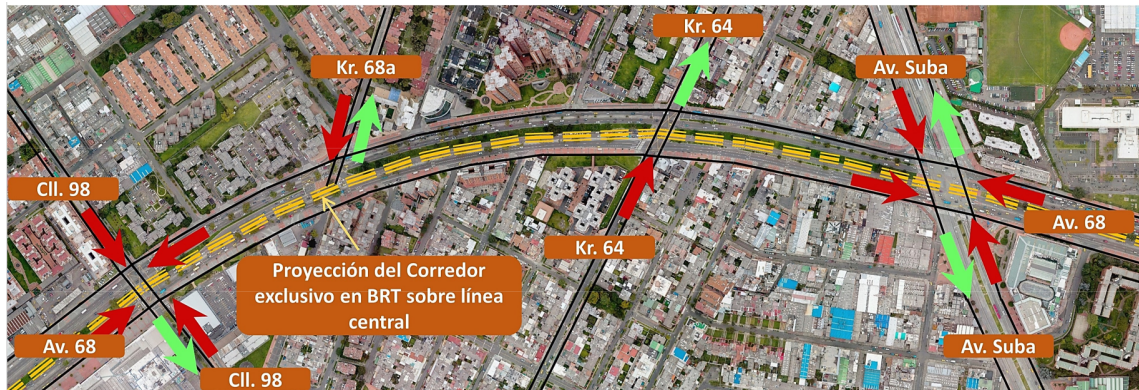


Figura 2. Zona de estudio

Fuente: tomada de (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2020).

Tabla 1. Velocidad operacional registrada en el tramo de estudio

Tipo	Sentido	Carril	Velocidad (km/h)
Vehículos exceptuando buses	Sur-norte	Lento	23
		Rápido	13
	Norte-sur	Lento	22
		Rápido	28
Buses	Sur-norte	Lento	19
	Norte-sur	Lento	18

La HDM determinada de esta manera fue entre las 08:45 y 09:45 horas, con un total de 9843 veh./h. En esta hora se procesaron los registros de volúmenes vehiculares por movimiento en cada una de las intersecciones, para ser ingresados en la microsimulación (tabla 2). De igual forma, se registraron las velocidades de operación en este intervalo mediante una pistola de velocidad Speedster III. La tabla 1 consolida los valores registrados en campo. En esta se puede observar que la velocidad más baja (13 km) se registra en la dirección sur-norte (de la calle 98 hacia la avenida Suba) sobre el carril rápido.

Metodología

La necesidad de resolver de manera integral el problema de transporte masivo de pasajeros de Bogotá conlleva estudiar las soluciones viales necesarias para desarrollar las fases futuras de integración. En particular, el tramo de estudio brinda conexión a cuatro localidades de Bogotá; por esta razón, se busca ofrecer una solución balanceada entre el transporte público y

privado que circula por la zona. Con base en la consulta de literatura, con la propuesta de modificaciones de la avenida 68 se busca una construcción gradual de sistema de transporte BRT, específicamente se consideran las recomendaciones del Consejo Nacional de Política Económica y Social ([Departamento Nacional de Planeación \(DNP\), 2010](#)) en el documento No. 3677 de 2010, y que tiene por título *Movilidad integral para la región capital Bogotá, Cundinamarca*.

Como procedimiento de diseño de las propuestas de mejoras y acondicionamiento para el BRT se siguieron los elementos propuestos dentro del Manual de diseño de carreteras ([Ministerio de Transporte, 2008](#)) y la guía de planeación de buses de tránsito rápido ([Wright y Hook, 2007](#)). El prediseño de las diferentes soluciones se realizó con:

- Elementos acotados en el capítulo 7 del *Manual de señalización vial* ([Ministerio de Transporte 2015](#)).
- Esquemas base de intersecciones del *Manual de diseño de carreteras*.
- Los criterios básicos de diseño de las secciones 6.3.2.1.y 6.3.2.2 del *Manual de diseño de carreteras* ([Ministerio de Transporte, 2008](#)).
- El anexo técnico sobre la construcción del sistema TransMilenio de la avenida carrera 68 desde la carrera 9 hasta la autopista Sur ([Instituto de Desarrollo Urbano \(IDU\), 2019](#)).

Se propone una intervención por etapas, con la adopción de un esquema de inversión progresivo en el que se realiza la modelación de cada una de estas seis etapas o escenarios, a partir de la introducción del BRT sobre el carril rápido actual, adición de una glorieta, carriles para vehículos mixtos adicionales y la proyección de la solución total a veinte años. La valoración de las intervenciones se realizó con el *software VISSIM*, debido a las facilidades mencionadas previamente. Los volúmenes de tráfico se proyectaron con una tasa de crecimiento de 1,57 %, según lo indicado en el apartado 6.2.3 del *Manual de diseño geométrico de carreteras* ([Ministerio de Transporte, 2008](#)).

Situación actual

Se inició con la simulación del estado actual del tramo de estudio para contar con un modelo de partida confiable en el *software VISSIM* ([PTV AG, 2015](#)) que se ajustara a los datos recopilados en campo (p. ej., volúmenes y velocidades) y las observaciones de las visitas al sitio (p. ej., puntos de congestión y longitud de colas). En el *software* se ingresaron las condiciones geométricas y los volúmenes vehiculares contabilizados. El ajuste o calibración del modelo se realizaron bajo la metodología expuesta por [Casares, A. y Galarraga, 2015](#), mediante un comparativo de los valores arrojados por la microsimulación con los medidos en las vías. La calibración se llevó a cabo tanto con los datos de volúmenes vehiculares como con las velocidades para las

Tabla 2. Volúmenes vehiculares medidos en campo y del modelo y, el valor GEH entre ambos

Movimiento o ramal	Fuentes o parámetro														
	Volúmenes medidos en campo					Volúmenes del Modelo					GEH				
	(Veh/h)					(Veh/h)									
	Autos	Buses	Camiones	Motos	Total veh.	Autos	Buses	Camiones	Motos	Total veh.	Autos	Buses	Camiones	Motos	Total veh.
Avenida 68 N-S lenta	1062	240	106	251	1659	1056	235	106	250	1647	0,18	0,34	0,00	0,07	0,30
Avenida 68 N-S rápida	2190	0	16	593	2799	2113	0	12	530	2655	1,67	0,04	1,13	2,67	2,76
Calle 98 mov. 3W	425	14	33	61	533	429	18	36	67	550	0,19	1,00	0,51	0,75	0,73
Calle 98 mov. 4E	125	0	9	22	156	147	0	7	24	178	1,85	0,04	0,71	0,42	1,70
Avenida 100 N-S lenta	1248	230	58	64	1600	1286	227	66	122	1701	1,05	0,20	1,02	6,01	2,49
Avenida 100 N-S rápida	1193	0	14	272	1479	1157	0	12	282	1451	1,04	0,04	0,55	0,62	0,73
Carrera 68	672	12	48	60	792	596	14	38	43	691	3,02	0,55	1,46	2,40	3,71
Avenida Suba W-S	127	22	3	19	171	95	21	5	13	134	3,06	0,24	1,09	1,50	3,00
Carrera 64	454	2	13	88	557	455	0	9	75	539	0,04	2,00	1,08	1,72	0,77

entradas y salidas de las cuatro intersecciones. La comparación de estos volúmenes se ejecutó mediante el estadístico utilizado en los estudios de tráfico (Rincón-Numpaque *et al.*, 2020), denominado factor GEH Geoffrey E. Havers, ecuación (1)). Si al menos el 85 % de los valores GEH se encuentran por debajo de 5, el modelo se considera calibrado en cuanto a volúmenes. El valor de GEH se evalúa mediante la ecuación (1):

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \leq 5 \quad (1)$$

Donde, M representa los valores obtenidos desde el modelo, y C , los datos medidos en campo. La tabla 2 presenta los volúmenes de los vehículos tomados en campo y los determinados en la evaluación del modelo y el comparativo GEH por tipo de vehículo (casillas sombreadas). Se observa que todos los GEH calculados son inferiores a 5, tanto para cada tipo de vehículo como para el total (máximo valor 3,71); en consecuencia, el modelo se encuentra calibrado en cuanto a volúmenes.

En la figura 3 se muestra la correlación (ajuste por mínimos cuadrados) entre los datos aforados en campo y los resultados arrojados por la simulación, en cuanto a la variable velocidad, donde se logra un nivel de calibración adecuado para un valor mayor o igual al 90 %. En este caso, el valor de R^2 es de 98,68%; por tanto, el modelo se encuentra calibrado por velocidad.

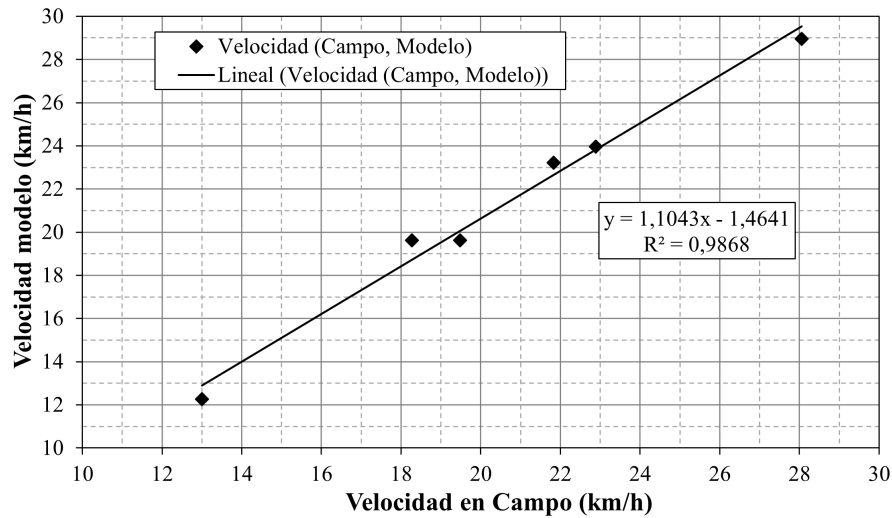


Figura 3. Correlación de la variable velocidad

Fuente: tomada de (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2020).

Propuesta etapa I: situación actual con la adición del BRT

Esta propuesta consistió en destinar las calzadas rápidas en ambos sentidos de la avenida 68 para uso exclusivo del BRT (p. ej., norte-sur y sur-norte), con cambio en su geometría en las intersecciones a pasos a desnivel (deprimidos), para evitar las intersecciones semaforizadas y mejores tiempos de desplazamiento por el corredor vial. Lo anterior se soporta en que el incremento de la fase de permanencia en verde de los semáforos para el BRT causa retrasos muy altos en el tráfico de las intersecciones como ha sido reportado (Chepuri *et al.* (2015), Siddique y Khan, 2006) y una alta concentración de densidad de vehículos en las intersecciones que se observaron en la simulación del estado actual. Se suspendió el tránsito de los vehículos colectivos de servicio público y el tránsito mixto se trasladó en su totalidad a las calzadas laterales (carril lento inicial). En las intersecciones se mantuvo un tramo del carril rápido para permitir giros a la izquierda que son fundamentales para el acceso a los barrios de la zona de estudio. La estación proyectada para BRT se ubica entre la avenida 68 entre carreras 68A y 65, con ingreso peatonal mediante un puente localizado en la carrera 65.

Propuesta etapa II: adición de glorieta en cinco años

Considerando los estudios previos sobre la combinación de glorietas con pasos elevados y deprimidos como solución alternativa a intersecciones con altos volúmenes de tráfico (Rincón-Numpaqué *et al.*, 2020), se plantea una glorieta en el cruce de la avenida 68 con avenida Suba.

A través de la glorieta se da la integración exclusiva del BRT que actualmente está funcionando sobre la avenida Suba con la propuesta del BRT sobre la avenida 68. Por otra parte, el tráfico mixto sobre la avenida 68 se canaliza a través de un deprimido (hundimiento de los carriles) que cruza bajo la avenida Suba debido a la alta demanda vehicular que circula por esta avenida. Finalmente, el tráfico mixto sobre la avenida Suba mantiene su flujo a través de un paso elevado (puente). De esta manera, se elimina cualquier conflicto entre el los BRT y el tráfico mixto en la intersección.

Para la estimación de los volúmenes, se partió de los volúmenes actuales y el incremento esperado del parque automotor (vehículos mixtos) para las dos localidades en las que se encuentra el tramo de la troncal (p. ej., Suba y Barrios Unidos) que fueron tomados desde la (Secretaría de Movilidad (2015)) que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Tasas anuales de incremento del tránsito estimadas para la ciudad

Localidad	Periodo				Tasa media ponderada por año [%]	Tasa media anual [%]
	2003-2007	2007-2010	2010-2015	2015-2020		
Suba [%]	2,21	2,09	1,97	1,75	2,00	1,57
Barrios Unidos [%]	0,83	0,70	1,99	0,87	1,14	

Los volúmenes futuros calculados a través de la expresión (2):

$$T_f = T_o(1 + r)^n \quad (2)$$

Donde, T_f y T_o son el tránsito futuro e inicial respectivamente; r y n son la tasa de crecimiento anual y el número de años a proyectar, respectivamente. De esta manera, la cantidad de pasajeros y las cifras de buses del BRT requeridos para alcanzar el 90 % de la capacidad de ocupación son estimadas a partir de estas tasas.

Propuesta etapa III: adición de carril para vehículos mixtos en diez años

Debido al incremento en los volúmenes vehiculares en diez años y la demanda latente generada por los vehículos mixtos, como se presenta más adelante, es necesario un carril adicional en la calzada sentido occidente-oriente (de la calle 98 hacia la avenida Suba), con la finalidad de conservar o aumentar las velocidades en los vehículos mixtos y así garantizar la viabilidad de las soluciones propuestas.

Propuesta etapa IV: adición de segundo carril para vehículos mixtos en quince años

Los resultados del escenario de calibración (situación base) muestran que el flujo crítico de vehículos se presenta en la calzada rápida sentido oriente-occidente (velocidades más bajas de todos los movimientos), y que se asocia a los tiempos de espera de los usuarios que realizan maniobras para ir del sur hacia el occidente o retornar al sur. Para responder a esta situación, se adicionó un segundo carril en la calzada de la avenida 68 para el tráfico mixto (de la avenida Suba hacia calle 98) y que buscó mantener unas condiciones operacionales estables del tramo de estudio para la proyección del parque automotor.

Proyección final a veinte años

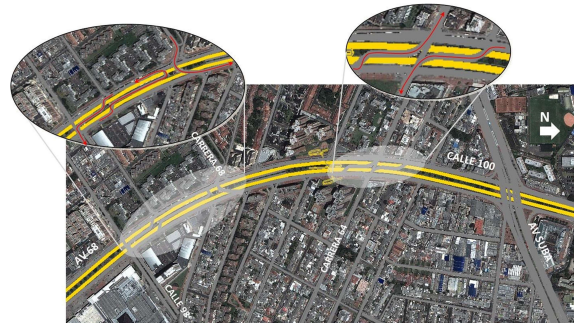
Al considerar los resultados de la etapa anterior que son presentados más adelante, en una etapa final se procede a validar las propuestas de mejoras en el largo plazo, se mantiene la geometría de la etapa IV y los volúmenes vehiculares proyectados.

RESULTADOS

La figura 4 presenta cada una de las modificaciones para las etapas propuestas. En estas se puede observar las intervenciones sobre la infraestructura actual, en color amarillo se presenta los carriles exclusivos del sistema TransMilenio, las líneas y flechas de color rojo indican los giros a la izquierda junto al separador central (figuras 4A y 4D) para garantizar la accesibilidad al sector. Las líneas de color rojo paralelas a los carriles que se indican en las figuras 4B a 4D corresponden a los carriles de vehículos mixtos adicionales.

A manera de ejemplo se presenta el escenario del tramo de estudio con todas las intervenciones propuestas en la figura 5, la cual ilustra un instante de la simulación para la propuesta final (deprimido+glorieta+carril lento en cada sentido), donde se evidencia el patrón de flujo y las modificaciones sugeridas.

En la figura 6 se visualiza el comportamiento de las velocidades para cada una de las intervenciones y periodos indicados previamente. En esta figura también se observa que, al reducir los vehículos de transporte público sobre el carril mixto debido a la inclusión del BRT (etiquetado como Transmilenio), se incrementa las velocidades tanto de todos los vehículos (de 20,5 km/h a 25,5 km/h) como del BRT comparado con el transporte público actual, debido a que los conductores realizan maniobras sobre los corredores exclusivos sin preocuparse por los vehículos motorizados y peatones (Rangarajan, 2010). Lo anterior indica que el transporte público colectivo que circula por la avenida 68 reduce la capacidad operacional del corredor vial estudiado. Por otra parte, en el escenario de cinco años se presenta que para toda la tipología de vehículos y en ambos sentidos del flujo se aumenta la velocidad operacional, lo cual es



a) Situación actual con la adición del BRT



b) Adición de glorieta y carril para vehículos mixtos en diez años



c) Adición de segundo carril para vehículos mixtos en quince años



d) Solución completa

Figura 4. Modificaciones en el tramo de estudio sobre el software VISSIM



Figura 5. Simulación en el software VISSIM de la solución vial completa en veinte años

generado por la sustitución de la intersección semaforizada de la avenida Suba por la glorieta.

La adición de carril para vehículos mixtos en diez años conserva las velocidades promedio, entre 34,30 km/h y 34,19 km/h. De igual forma, el segundo carril para vehículos mixtos en quince años permite conservar este comportamiento, así se logra que la velocidad media del sistema pase de 34,20 km/h a 35,06 km/h. En el largo plazo (proyección a veinte años), se observa que en el caso de los vehículos mixtos se genera un decremento en las velocidades por el aumento de los flujos vehiculares y la velocidad promedio cambia desde 35,06 km/h a 32,85 km/h. La velocidad del sistema TransMilenio se mantiene en el tiempo y se observa que se encuentra dentro de la velocidad media para este tipo de sistema de buses: 30 km/h (Rangarajan, 2010).

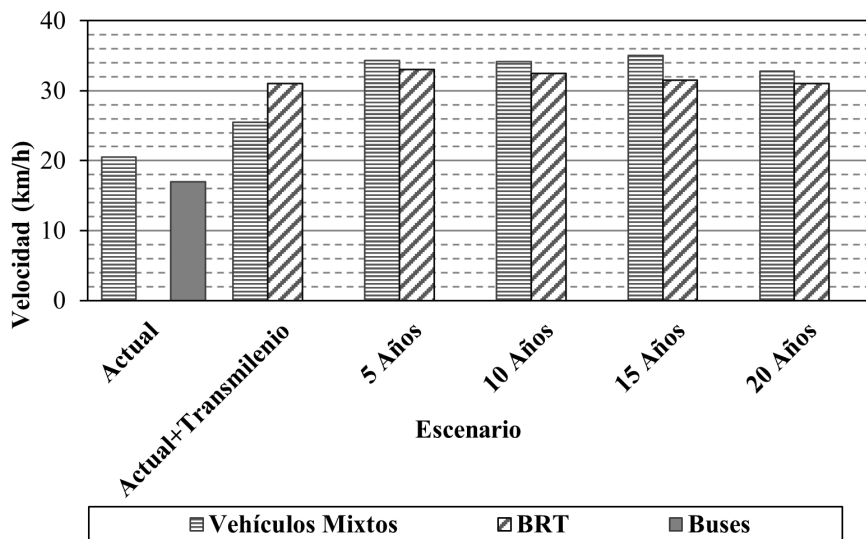


Figura 6. Comportamiento de las velocidades en el tramo de estudio

La figura 7 ilustra el aumento de tráfico en la zona de estudio. Como es de esperarse, la demanda latente en el escenario actual es mínima, ya que corresponde a la condición calibrada. En particular, en las etapas I y II (adicción del BRT y glorieta, respectivamente) se presenta la mayor demanda latente, al trasladar el tránsito mixto a las calzadas laterales (calzadas lentas actuales) sin introducir mejoras geométricas a este tipo de vehículos, hecho que confirma que se ha superado la capacidad de la infraestructura. Al introducir un carril adicional para los vehículos mixtos en el sentido occidente-oriente (i.e. 10 años) y oriente-occidente (p. ej., quince años) se logran reducciones de la demanda latente del 5 % y 4 %, respectivamente. Por último, al proyectar cinco años adicionales de funcionamiento con todas las modificaciones (o etapa de intervención) implementadas, se genera un incremento de la demanda latente en un 2 % del volumen total de vehículos, lo cual es una consecuencia de las tres intersecciones semaforizadas para los carriles mixtos y la gran ocupación que presenta el tramo de estudio.

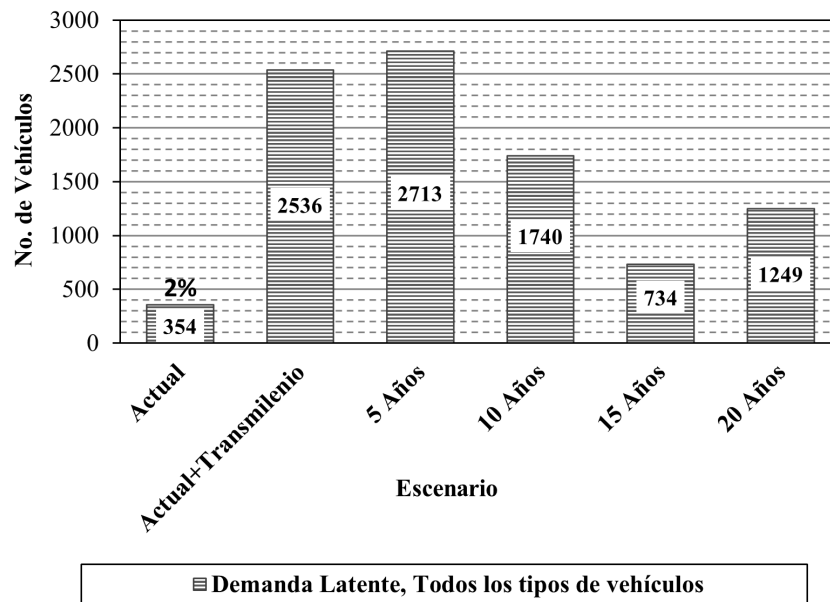


Figura 7. Demanda latente del tramo en la troncal avenida carrera 68

CONCLUSIONES

El programa *VISSIM* ha mostrado ser pertinente para simular el comportamiento actual del tramo de estudio, donde se logró un modelo ajustado con un GEH menor de 4 para los volúmenes registrados en campo, y correlación mayor al 98 % para la velocidad en el tramo de estudio, lo cual soporta el uso de este tipo de programas o algoritmos de seguimiento estocástico para el caso de tramos de vías arteriales.

Una secuencia de soluciones ha sido propuesta para viabilizar la permanencia en el tiempo de un sistema de buses rápidos (llamado TransMilenio) que se busca instalar sobre la avenida 68 y que implica cambios en la geometría, instalación de una glorieta, carriles adicionales para los vehículos mixtos y pasos a desnivel. A través de las simulaciones se encuentra que en el corto como en el largo plazo las velocidades de operación del BRT de Bogotá en esta zona de la troncal de la avenida 68 estarán por encima de la velocidad del sistema de transporte colectivo que circula en esta zona. En particular, la velocidad de operación promedio del TransMilenio es de 38 km/h en todo el periodo de estudio, y a veinte años, se logran velocidades similares tanto en el BRT como en los vehículos mixtos que transitan por el tramo de estudio.

La implementación de carriles adicionales para el tránsito mixto ha demostrado ser un requerimiento indispensable para compensar la demanda latente que surge por la proyección de los volúmenes de tránsito de vehículos mixtos en el tramo estudiado (como se observa en la figura 7). En esta dirección, es necesario establecer políticas adicionales que busquen promover la elección del transporte público masivo y reducir la movilidad en vehículos particulares en la zona para garantizar la sostenibilidad de la red vial a mayor plazo, y reducir los impactos ambientales del transporte.

Este estudio representa un inicio en el análisis de las intervenciones que se deben realizar en las futuras líneas de expansión del BRT que se implementan sobre un carril exclusivo en la bahía central, o carril rápido, de las vías arteriales que componen la ciudad. Este se encuentra condicionado a la información disponible de las condiciones operacionales y las características geométricas del tramo de estudio. Se recomienda incorporar un estudio multiobjetivo en las futuras modelaciones para lograr resultados más integrales en cuanto a tráfico, emisiones y conflictos con los demás agentes (p. ej., peatones) en las intersecciones ([Bahmankhah et al., 2019](#), [Rincón-Numpaqué et al., 2020](#)).

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan que este artículo es producto resultado del ejercicio académico como profesor de la Universidad Militar Nueva Granada. Los autores agradecen el apoyo recibido por la institución. Algunos datos de semaforización y geometría de la zona de estudio fueron obtenidos desde la Secretaría de Movilidad de Bogotá. Se agradece el apoyo recibido por parte del ingeniero Lenin A. Bulla-Cruz quien, con sus ideas, observaciones y recomendaciones, ayudó a que se pudiera generar este resultado de investigación.

REFERENCIAS

- Aakre, E. y Aakre, A. (2017). Simulating transit priority: Continuous median lane roundabouts. *Procedia Computer Science*, 109, 849-854. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.400>. ↑Ver página 35
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014). *Medidas para la movilidad de la ciudad, anunció Pardo*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/medidas-para-la-movilidad-de-la-ciudad-anuncio-pardo>. ↑Ver página 34, 37
- Ancora, V., Nelli, C. y Petrelli, M. (2012). A microsimulation model for BRT systems analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 1250-1259. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.839>. ↑Ver página 36
- Bahmankhah, B., Fernandes, P. y Coelho, M. C. (2019). Cycling at intersections: A multi-objective assessment for traffic, emissions and safety. *Transport*, 34(2), 225-236. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8946>. ↑Ver página 48
- Bocarejo, J. P. y Urrego, L. F. (2020). The impacts of formalization and integration of public transport in social equity: The case of Bogota. *Research in Transportation Business and Management*, 42, 100560. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100560>. ↑Ver página 34
- Casares, A. y Galarraga, J. (2015). *Calibración del modelo de seguimiento de VISSIM en carreteras multicarriles de Uruguay* [Conferencia]. XXIX Congreso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet, 9 a 13 de noviembre, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/AC601.pdf. ↑Ver página 34, 40
- Carmona-Aparicio, L. G., Rincón-Pérez, M. A., Castillo-Robles, A. M., Galvis-Remolina, B. R., Sáenz-Pulido, H. E., Manrique-Forero, R. A. y Pachón-Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios *top-down* y *bottom-up* de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Tecnura*, 20(49), 59-74. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>. ↑Ver página 33
- Chaparro, I. (2002). *Evaluación del impacto socioeconómico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá. El caso del sistema de transporte masivo, TransMilenio*. Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina (Cepal), División de Recursos Naturales e Infraestructura, Unidad de Transporte. <https://digitallibrary.un.org/record/482685>. ↑Ver página 33
- Chepuri, A., Raju, N., Bains, M. S., Arkatkar, S. y Joshi, G. (2018). Examining performance of an urban corridor using microscopic traffic simulation model under mixed traffic environ-

- ment in India. *European Transport - Trasporti Europei*, (69), 1-21. http://www.istiee.unict.it/europeantransport/papers/N69/P02_69_2018.pdf. ↑Ver página 35, 36
- Chepuri, A., Kulakarni, R., Singh Bains, M., Arkatkar, S. y Joshi E., G. (2015). Evaluation of BRTS corridor in India using microscopic simulation: A case study in Surat City. En *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* (vol. 10). <https://www.researchgate.net/publication/319443287>. ↑Ver página 33, 35, 42
- Cortés, J. (2016). *¿Cuáles son los grandes retos de un sistema de transporte masivo para Bogotá?* Alcaldía de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/cuales-son-los-grandes-retos-de-un-sistema-de-transporte-masivo-para>. ↑Ver página 37
- Cortés, V., Urazán, C. F., & Escobar, D. A. (2020). Accesibilidad territorial urbana ofrecida por la red de TransMilenio según condición socioeconómica. Caso Bogotá (Colombia). *Revista Espacios*, 41(29), 356-370. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n29/a20v41n29p26.pdf>. ↑Ver página 34
- D'Ambrogio, A., Iazeolla, G., Pasini, L. y Pieroni, A. (2009). Simulation model building of traffic intersections. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4), 625-640. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.11.001>. ↑Ver página 34
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2010). *Documento Conpes de movilidad integral para la región capital Bogotá - Cundinamarca*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3677.pdf>. ↑Ver página 40
- Duduta, N., Adriazola, C., Hidalgo, D., Lindau, L. A. y Jaffe, R. (2012). Understanding road safety impact of high-performance bus rapid transit and busway design features. *Transportation Research Record*, 2317(1), 8-14. <https://doi.org/10.3141/2317-02>. ↑Ver página 34
- Espinel-Duarte, L. E., Ladino-Chaves, O. y Iguarán-Salinas, L. D. (2018). Diagnóstico de los efectos generados por el tráfico de largo destino en la malla vial del municipio de Cachipay, Cundinamarca. *Tecnura*, 22(56), 62-75. <https://doi.org/10.14483/22487638.13761>. ↑Ver página 33
- Global BRT Data. (2020). *Mirando ahora mundo*. <https://brtdata.org/>. ↑Ver página 37
- Godavarthi, G. R., Chalumuri, R. S. y Velmurugun, S. (2014). Measuring the performance of bus rapid-transit corridors based on volume by capacity ratio. *Journal of Transportation Engineering*, 140(10), 04014049. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000698). ↑Ver página 34, 36

- Hook, W. (2005). Institutional and regulatory options for bus rapid transit in developing countries: Lessons from international experience. *Transportation Research Record*, 1939(1), 184-191. <https://doi.org/10.3141/1939-21>. ↑Ver página 33
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2019). *Anexo 1. Anexo técnico. Construcción para la adecuación al sistema Transmilenio de la avenida Congreso Eucarístico (carrera 68) desde la carrera 9 hasta la autopista Sur y obras complementarias en Bogotá, D. C.* Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://community.secop.gov.co/Public/Archive/RetrieveFile/Index?DocumentId=37793486>. ↑Ver página 34, 37, 40
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2020). *Infraestructura de datos espaciales para el Distrito Capital. Mapas de Bogotá*. <https://mapas.bogota.gov.co/>. ↑Ver página 37, 39, 42
- Instituto de Transportación y Desarrollo de Políticas (ITDP). (2016). *The BRT standard*. <https://www.itdp.org/publication/the-brt-standard/>. ↑Ver página 37
- Ipus-Gaviria, O. N., Chaves-Pabón, S. B. y Riascos-Caipe, M. E. (2016). Evaluación técnica mediante procesos de micro simulación en tres intersecciones en Montería, Córdoba. *Avances Investigación en Ingeniería*, 13(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.253>. ↑Ver página 35, 36
- Kawanzi, A. y Benon, H. (2018). *Assessing the impact of signalization of Kubiri roundabout* [Tesis de grado, Makerere University]. Repositorio Institucional de Makerere University. <http://www.dissertations.mak.ac.ug/bitstream/handle/20.500.12281/6146/kawanzi-CEDAT-Bachelors.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. ↑Ver página 35
- Lizárraga-Mollinedo, C. (2006). Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI. *Economía, Sociedad y Territorio*, VI, 1-35. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11162202%5CnEconomía>. ↑Ver página 33
- Ministerio de Transporte. (2008). *Manual de diseño geométrico de carreteras*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11313-manual-de-diseno-geometrico-de-carreteras-2008>. ↑Ver página 34, 37, 40
- Ministerio de Transporte. (2015). *Manual de señalización vial*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3825-manual-de-senalizacion-vial-2015>. ↑Ver página 40
- Monzón, A., Ortega, E. y López, E. (2013). Efficiency and spatial equity impacts of high-speed rail extensions in urban areas. *Cities*, 30(1), 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.002>. ↑Ver página 33

- Muñoz González, N. F. (2011). *Análisis neoinstitucional de la política pública para la reforma del sistema de transporte de Bogotá - Sistema Integrado de Transporte Público SITP - en su aporte a la construcción del derecho a la ciudad y a la movilidad en Bogotá* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1407>. ↑Ver página 36
- Ni, Y.-C., Lo, H.-H., Hsu, Y.-T. y Huang, H.-J. (2020). Exploring the effects of passive transit signal priority design on bus rapid transit operation: a microsimulation-based optimization approach. *Transportation Letters – The International journal of Transportation Research*, 14(1), 14-27. <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1805681>. ↑Ver página 35
- PTV AG. (2015). *PTV VISSIM 8 user manual*. <https://pdfcoffee.com/qdownload/vissim-8-manualpdf-pdf-free.html>. ↑Ver página 40
- Raju, N., Arkatkar, S. y Joshi, G. (2017). *Examining effect of bottleneck on multi-lane roads at midblock sections using simulation* [Conferencia]. ASCE India Conference 2017, diciembre 12-14, Nueva Delhi, India. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784482025.071>. ↑Ver página 34
- Raju, N., Chepuri, A., Arkatkar, S. y Joshi, G. (2020). A simulation study for improving the traffic flow efficiency of an intersection coupled with BRT. *European Transport - Transporti Europei*, (75), 1-25. <http://www.istiee.unict.it/sites/default/files/files/Paper%201%20n%2075.pdf>. ↑Ver página 35
- Rangarajan, A. (2010). BRTS- Bus Rapid Transit System in Pune modeling, simulation and feasibility analysis. En *Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dhaka* (pp. 781-785). <http://www.ieomsociety.org/paper/167%20Ananth.pdf>. ↑Ver página 33, 44, 46
- Ratrout, N. y Rahman, S. (2009). A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(1B), 121-133. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4b3a511a8da06ef88af25dc00b93b5646e81f7f5>. ↑Ver página 35
- Rincón-Numpaqué, N., Moreno-Anselmi, L. Á., Rodríguez-Polo, K. A. y Gaviria-Mendoza, C. A. (2020). Alternativas de mejoramiento operacional de la movilidad en glorietas usando microsimulación. *Respuestas*, 25(2), 26-36. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2372>. ↑Ver página 36, 41, 42, 48
- Rivera, J., Ricci, L., Das-Neves, G., Brizuela, L., Oviedo, M. y Villanueva, M. (2011). *Evaluación sobre retomes de autovías argentinas mediante micro-simulación de tránsito* [Conferencia].

8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Uruguay. <https://www.researchgate.net/publication/366292225>. ↑Ver página 34

Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, S. (2018). *Aplicación del modelo de predicción de accidentes en vías de uso exclusivo de BRT, según el manual de seguridad vial (HSM 2010) de Estados Unidos, estudio de caso: ciudad de Bogotá, troncal Caracas* [Conferencia]. XX CLATPU, Medellín, Colombia. <https://www.researchgate.net/profile/Kelly-Rodriguez-2/publication/330661110>. ↑Ver página 37

Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, S. (2019). Safety performance functions in Dedicated Bus Lane of BRT on Caracas Avenue Corridor at Bogotá city. *Inge Cuc*, 15(2), 66-77. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.07> ↑Ver página 33, 38

Secretaría de Movilidad. (2015). *Movilidad en cifras 2015*. Alcaldía Mayor de Bogotá. https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf ↑Ver página 43

Serafín-González, S. L. (2019). Externalidades de las emisiones del transporte público en Tepic, México: cambio climático y sustentabilidad. *Tecnura*, 23(62), 34-44. <https://doi.org/10.14483/22487638.15455>. ↑Ver página 33

Siddique, A. J. y Khan, A. M. (2006). Microscopic simulation approach to capacity analysis of Bus Rapid Transit corridors. *Journal of Public Transportation*, 9(3), 181-200. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.9.3.10>. ↑Ver página 34, 36, 42

Wright, L. y Hook, W. (Ed.). (2007). *Bus rapid transit planning guide*. (3.ª ed.). Institute for Transportation and Development Policy. https://nacto.org/docs/usdg/brt_guide_itdp.pdf. ↑Ver página 40

Zheng, F., Chen, J., Wang, H., Liu, H. y Liu, X. (2020). Developing a dynamic utilisation scheme for exclusive bus lanes on urban expressways: an enhanced CTM-based approach versus a microsimulation-based approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(12), 1657-1664. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0546>. ↑Ver página 36



Análisis del modelo de transferencia de conocimiento en el sector palmífero colombiano

Analysis of the knowledge transfer model in the Colombian palm oil sector

José Ignacio Campos Naranjo ¹, Germán Forero-Cantor ²

Fecha de Recepción: 14 de febrero de 2022

Fecha de Aceptación: 18 de agosto de 2022

Cómo citar: Campos-Naranjo, J. I., Forero-Cantor, G. (2023). Análisis del modelo de transferencia de conocimiento en el sector palmífero colombiano. *Tecnura*, 27(76), 54-77. <https://doi.org/10.14483/22487638.19071>

Resumen

Contexto: La cadena de valor en el proceso de transformación de un bien involucra la interacción estratégica y coordinada de agentes externos e internos en la generación de valor. El aceite de palma es un producto de relevancia mundial que forma parte de un sector dinámico en términos de su producción y comercialización por parte de múltiples empresas, por lo que es pertinente comprender cómo se obtiene, gestiona y transfiere el conocimiento para poder permanecer en un mercado altamente competitivo.

Métodología: Se soportó en el estudio de caso a partir de la información de 65 encuestas semiestructuradas aplicadas a agentes comerciales y no comerciales del sector, al cual fue contrastada a través del método de triangulación de Denzen, y analizada tanto por medio de codificación descriptiva y abierta, como a partir de una depuración y categorización.

Resultados: Los requerimientos de conocimiento especializado por parte de los productores, para mejorar su eficiencia y mitigar los impactos medioambientales derivados del proceso productivo, son gestionados por un agente centralizador que administra la generación y transferencia de conocimiento.

Conclusiones: Los entes científicos encargados de generar y transferir conocimiento, así como las organizaciones responsables de la regulación medioambiental operan de forma restringida y discriminatoria con los productores debido a sus limitaciones en términos de disponibilidad de recursos y su ubicación geográfica.

Palabras clave: productividad, redes de conocimiento, cadena de valor.

Abstract

Context: The value chain in the production process of a good involves the strategic and coordinated interaction of external and internal agents in the value generation process. Palm oil is a globally relevant product that is part

¹Ingeniero industrial, especialista en Gerencia de Mercados, magíster en Ingeniería de sistemas. Docente Facultad de Ingeniería Universidad Libre, Bogotá, Colombia. Email: josei.camposn@unilibre.edu.co

²Ingeniero de petróleos, economista, magíster en Economía, Ph. D. Economía Agroalimentaria. Docente Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia. Email: gaforero@ut.edu.co

of a dynamic sector in terms of its production and commercialization by multiple companies, so it is necessary to understand how knowledge is obtained, managed, and transferred to remain in a highly competitive market.

Methodology: A case study methodology was developed based on the information from 65 semi-structured surveys applied to commercial and non-commercial agents in the sector, which was contrasted through Denzen's triangulation method, analyzed by means of descriptive and open coding, and finally interpreted through a process of purification and categorization of the compiled information.

Results: The specialized knowledge requirements of producers to improve their efficiency and mitigate the environmental impacts derived from the production process are managed by a centralizing agent who administers the processes of knowledge generation and transfer.

Conclusions: Scientific institutions in charge of generating and transferring knowledge as well as organizations responsible for environmental regulation operate in a restricted and discriminatory manner with producers due to their limitations in terms of resource availability and geographical location.

Keywords: productivity, knowledge networks, value chain.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	55
Marco teórico	56
El sector palmicultor colombiano	57
Metodología	59
Análisis de la generación, validación y apropiación de conocimiento	62
Aspectos medioambientales	63
Resultados	64
Conclusiones	68
Referencias	69

INTRODUCCIÓN

La cadena de valor en el proceso de transformación de un bien involucra la interacción estratégica y coordinada de agentes externos e internos en la generación de valor que integran la oferta y demanda de mercado. Esto influye sobre los resultados ambientales, sociales y económicos de las organizaciones de manera directa e indirecta (Bouzon *et al.*, 2012, Lambert *et al.*, 2005, Porter, 1987). La creciente competencia a nivel global entre pequeñas y grandes firmas ha hecho necesario dinamizar la transferencia de conocimiento como mecanismo fundamental en la generación de valor (Nonaka *et al.*, 2000), ya que estos, además de ser articuladores

entre los componentes de la cadena de valor para mejorar la capacidad de innovación (Shaw y Williams, 2009, Wang *et al.*, 2020), son fuente potencial de ventaja competitiva (Ambrosini y Bowman, 2001, Coakes *et al.*, 2004, Pasaribu *et al.*, 2017, Sensuse *et al.*, 2014).

El aceite de palma es un producto agrícola que en los últimos años ha adquirido una alta relevancia mundial explicada por el incremento en su comercialización y por los impactos medioambientales que se generan en su elaboración (Russell, 2018, Unilever, 2021). En el continente americano, Colombia es el país líder en producción de aceite de palma, por encima de países como Brasil, pero bastante alejado de los del sureste asiático que son los principales productores mundiales (Lesage *et al.*, 2021). Sin embargo, el sector palmero colombiano enfrenta desafíos de competitividad y productividad (Beltrán *et al.*, 2015) y problemas fitosanitarios (Sanz, 2016), que generan un gran impacto económico y que se explican principalmente por las limitaciones en términos de asistencia técnica a fabricantes y a una baja adopción de tecnología en sus procesos (Cenipalma, 2020b).

En este contexto, es importante comprender cómo se obtiene, gestiona y transfiere el conocimiento (Machado y Davim, 2014), en un producto como el aceite de palma, el cual forma parte de un sector dinámico y altamente competitivo en el mundo, como el agrícola (Dirimanova y Radev, 2017), en donde el conocimiento se ha convertido en un factor fundamental para incrementar la productividad y estimular el uso eficiente de recursos (Romańczyk *et al.*, 2012). El objetivo de este artículo es analizar los principales elementos que explican la transferencia de conocimiento en el sector palmicultor colombiano, e identificar los principales agentes del sector, sus interacciones y las restricciones que enfrentan.

Marco teórico

En general, el término transferencia de conocimiento es el proceso dinámico e interactivo en el cual se sintetizan e intercambian conocimientos, se diseminan hallazgos de investigación y, de una manera ética, se aplican estos resultados para mejorar las prácticas y políticas en el interior de una organización, en un marco de interacciones entre quienes generan y utilizan el conocimiento (Michalos, 2017). En el sector agrícola, la transferencia de conocimiento se puede definir como el conjunto de actores que apoyan a los cultivadores en la solución de sus problemas a través del desarrollo de habilidades, tecnologías y estrategias que les permiten mejorar no solamente su eficiencia productiva sino su bienestar y calidad de vida (Trigo y Elverdon, 2019). En los países en vías de desarrollo, desde 1950 la transferencia de conocimiento en el sector agrícola se extendió principalmente a través de los agricultores (Franzel *et al.*, 2013) y esto se hizo evidente en algunas zonas de América Latina y Filipinas (Selener *et al.*, 1997). Luego, durante las décadas de 1970 y 1980, se dio origen al sistema de formación y visita, promovido por el Banco Mundial (Musa *et al.*, 2013), el cual se caracterizaba por ser un programa sistemático de formación para agricultores que buscaba promover la aplicación de buenas prácticas

agrícolas, motivar su adopción, evaluar las limitaciones de la producción y recomendar estrategias para superarlas (Baxter *et al.*, 1984). Luego, se establecieron los sistemas de extensión agrícola que buscaban divulgar nuevas estrategias, tecnologías y prácticas entre agricultores, a partir de dos funciones: primero, difundir con los agricultores las bondades de prácticas o tecnologías validadas previamente a través de la actividad en terreno; y segundo, de manera didáctica, instruir a los miembros de la comunidad para implementar nuevas tecnologías y poder resolver los problemas que puedan surgir de su aplicación (Taylor y Bhasme, 2018).

Otra herramienta de transferencia de conocimiento en el sector agrícola ha sido el uso de las parcelas demostrativas, las cuales surgen de la investigación aplicada (Havlin *et al.*, 1990). En estos terrenos, una nueva práctica o producto es implementado para mostrar directamente a los productores las bondades que se pueden esperar con su adopción. Asimismo, estas parcelas son una estrategia diseñada para comparar diferencias entre métodos de labranza, tratamientos con herbicidas, comportamiento de variedades o híbridos, usos de buenas prácticas agrícolas, métodos de aplicación de productos químicos y otros insumos para la producción agrícola (Tarasoff, 2016); lo cual es de vital importancia para optimizar la eficiencia en la fabricación.

En este contexto y desde la perspectiva de Lubell *et al.* (2011), los modelos de transferencia de conocimiento agrícola se desarrollan a partir de cuatro elementos básicos, donde el más importante es la participación de los diversos agentes, quienes dan origen a los otros tres: construcción de redes, desarrollo de conocimientos y adopción de nuevas prácticas. Estos, a su vez, tienen como pilares el aprendizaje social, experimental y técnico (Foster y Rosenzweig, 1995). Adicionalmente y en una analogía con las investigaciones realizadas por Mak (2011), la transferencia de conocimiento desarrollada por los palmicultores se asemeja al ciclo de aprendizaje de Kolb (1984), en el cual es clave generar una capacidad de aprendizaje a partir de experiencias y exigencias con el medio ambiente.

El sector palmicultor colombiano

El palmífero es un producto agrícola originario de África, con escasa participación en la producción agrícola mundial hasta la mitad del siglo XX (Ritchie y Roser, 2021), hacia 1960 se inició un proceso de crecimiento continuo en el cultivo del producto en el mundo, al pasar de una fabricación de 2 millones en 1970, a 79.16 millones de toneladas en 2022 (ProduccionAgricolaMundial.com, 2022). Los principales países productores son Indonesia, Malasia y Tailandia, donde inicialmente se implementó su cultivo como un sustituto del caucho y el estaño, pero incrementó su importancia de manera progresiva hasta llegar a representar el 85% de la fabricación mundial en 2019 (Poh *et al.*, 2020), crecimiento que se explica por las dinámicas en el mercado internacional, impulsado por la demanda de países como China, India, Brasil y la Unión Europea (Montoya *et al.*, 2020). Esta situación que condujo a la cuadruplicación de las

exportaciones entre 1998-2013 (Statista, 2022), y que el oleaginoso alcanzara una participación equivalente al 30 % del total del consumo de aceites y grasas en el mundo, en 2016 (Foo y Aziz, 2019). A Colombia es el cuarto productor mundial y el mayor en América (ProduccionAgricolaMundial.com, 2022) con un comportamiento dinámico en términos de su producción, como se presenta en la figura 1.

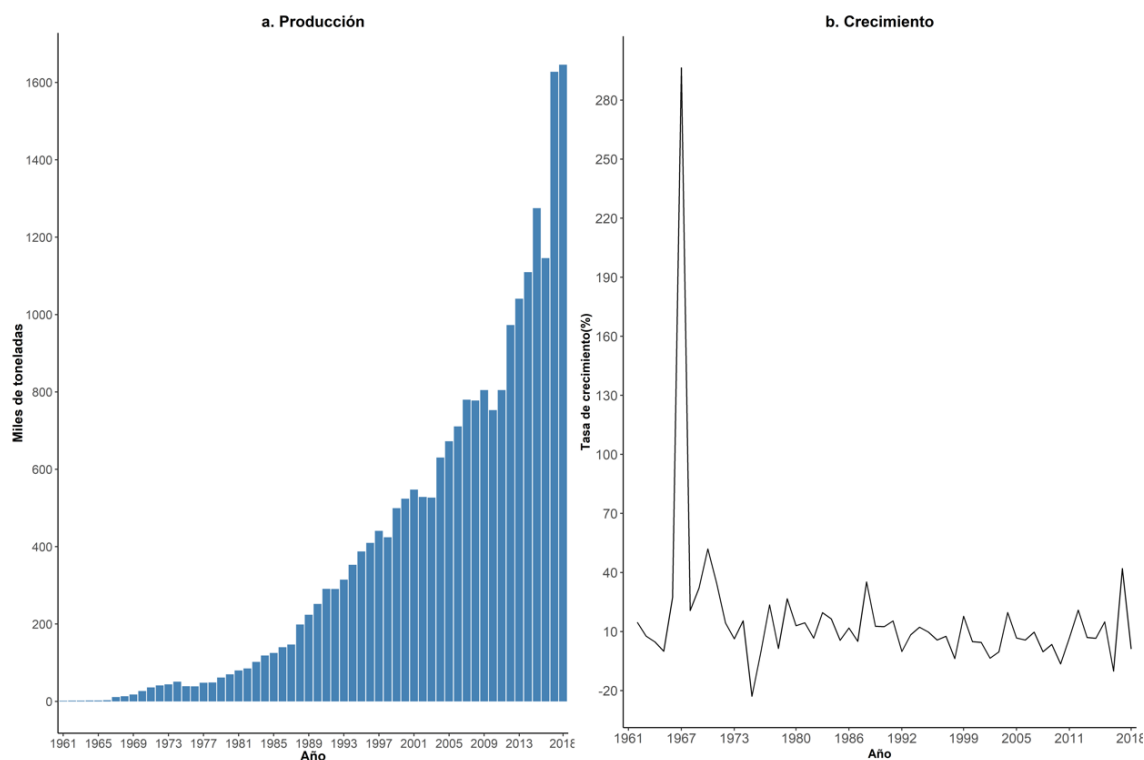


Figura 1. Evolución de los niveles y las tasas de incremento de la fabricación de aceite de palma en Colombia (1961-2018)

Nota: elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2022.

Se observa que, en concordancia con lo sucedido en el mundo, hubo un primer gran salto en términos de producción hacia finales de la década de 1960, cuando se triplicó la fabricación al pasar de 2800 a 11 000 toneladas producidas en 1967. Luego, hubo un crecimiento sostenido, con algunos altibajos en 1975 y 2016, con un incremento promedio del 16 % para el periodo 1961-2018, donde para este último año se alcanzó una producción de alrededor de un 1 600 000 toneladas en un área cultivada de 540 000 hectáreas (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma, 2022a), de las cuales el 47 % fue exportado, y el porcentaje restante fue destinado principalmente la producción de biocombustibles en los ámbitos locales (Fedepalma, 2022b).

Para 2020, el sector agrícola representó el 6,8% del producto interno bruto (PIB) total y dentro de este la palma de aceite contribuyó con un 6% (DANE, 2021); con lo que superó ampliamente a otras agro-cadenas de importancia para el país y representó una fuente importante de empleo con una generación de alrededor de 170 000 empleos entre formales e informales (MADR, 2020).

METODOLOGÍA

Un primer paso para el análisis del modelo de transferencia de conocimiento consiste en identificar a los agentes que conforman el sector palmicultor en Colombia. En este caso, se identifican dos tipos de agentes: los comerciales, quienes buscan beneficios económicos, y los no comerciales, que interactúan en el sector sin ánimo de lucro. En este sentido, los primeros son un grupo conformado por pequeños, medianos, grandes agricultores y extractoras; distribuidos geográficamente en cuatro zonas del país, quienes de manera permanente realizan interacciones de oferta y demanda en el mercado a través de técnicas de comunicación, cooperación, competencia e intercambio, relacionados con fruto fresco de palma, son agrupados y denominados por Fedepalma y Cenipalma (2010), como núcleos palmeros. De manera análoga, los no comerciales son el conjunto de entidades públicas y privadas cuyas actividades están enmarcadas en términos de un enfoque académico y científico, teniendo como objetivo el fortalecimiento del sector a través de actividades de investigación, innovación y desarrollo de bienes y servicios. Estos agentes interactúan en actividades relacionadas en lo que Glasbergen (2011) denomina un contexto situacional cambiante, y se presentan en la tabla 1.

La evidencia empírica procede del trabajo etnográfico realizado entre julio de 2018 y junio de 2019, en las cuatro grandes zonas palmeras del país (norte, suroccidental, oriental y central). Para lo cual se llevaron a cabo 51 entrevistas semiestructuradas a agentes comerciales, y 14 agentes no comerciales del sector, información registrada en la tabla 2.

La entrevista se diseñó con preguntas abiertas de forma que se pudiese comprender mejor la dinámica de transferencia de conocimiento del sector palmicultor colombiano. Antes de aplicar de forma definitiva el instrumento de recolección de información, se sometió a un pilotaje a agentes comerciales del sector, para luego hacer los ajustes necesarios y llegar a un instrumento definitivo. El instrumento se implementó con el consentimiento previo, expreso e informado de los participantes, quienes accedieron a proporcionar la información a condición de su anonimato, para su selección se utilizaron criterios de muestreo no probabilístico por conveniencia; técnica que permite seleccionar unidades representativas o típicas a criterio del investigador (Navidi, 2006). Se utilizaron sinopsis de las entrevistas y nombres ficticios en algunas secciones del texto para dar cumplimiento a la solicitud de los participantes del estudio. A fin de comprender la dinámica de transferencia de conocimiento, se partió de una metodolo-

Tabla 1. Agentes no comerciales

UAATA	Unidades de Asistencia y Auditoría Técnica, Ambiental y Social, responsables de la asistencia técnica a núcleos palmeros, existen tantas UAATA como núcleos palmeros (Fedepalma y Cenipalma, 2010).
Cenipalma	El Centro de Investigación en Palma de Aceite, que es el subsistema de investigación de la Federación Nacional de Palmicultores (Fedepalma), realiza procesos de investigación, innovación y desarrollo para aportar a la sanidad, productividad y sostenibilidad de la agroindustria desde la generación de insumos y mecanismos de implementación de mejores prácticas (Cenipalma, 2022).
UPRA	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria planifica el uso eficaz del suelo, define criterios y crea instrumentos necesarios para el efecto, analiza y prevé el panorama de riesgos, en la búsqueda de una mayor competitividad agropecuaria en los mercados internos y externo (UPRA, 2021a).
Agrosavia	La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria es una entidad pública descentralizada que genera conocimiento científico y desarrollo tecnológico agropecuario a partir de la investigación científica, adaptación de tecnologías, transferencia de conocimientos y asesoría para mejorar la competitividad agrícola (Agrosavia, 2022).
SENA	El Servicio Nacional de Aprendizaje: centro de formación gratuita que oferta programas técnicos, tecnológicos y complementarios enfocados al desarrollo económico, científico y social en Colombia (SENA, 2022b).
RSPO	Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible es una organización de carácter social que agrupa a los interesados del sector palmicultor, para desarrollar y aplicar normas mundiales orientadas hacia el logro de un aceite de palma sostenible (Round on Sustainable Palm Oil, 2022b).
RAC	Certificación Rainforest Alliance, sello que incita a la acción colectiva en favor de personas y capital natural, desarrolla y robustece los impactos positivos de las selecciones responsables, desde fincas y bosques hasta los supermercados. La certificación permite seleccionar artículos que contribuyen a la sostenibilidad del planeta (Rainforest Alliance, 2020).
ISCC	International Sustainability and Carbon Certification busca contribuir con el desarrollo de una fabricación y un uso ambiental, social y económicamente sostenibles de todo tipo de biomasa en las cadenas de valor mundiales (TUV, 2022).
Universidades	Espacio donde la labor intelectual se orienta a la comunicación, investigación, descubrimiento, creación (Navarrete, 2013).

gía de estudio de caso por fases, en congruencia con los criterios establecidos por [Stake \(1995\)](#) y [Yin \(2013\)](#), diseño que se representa en la figura 2.

Como alternativa para aumentar la objetividad y calidad del estudio, se contrastaron los datos obtenidos en cada una de las encuestas, y se tomó como fundamento el método de triangulación de [Denzin \(1970\)](#). Se participó en eventos relacionados con el sector, como la XVIII Conferencia Internacional 2018 sobre el oleaginoso, el Foro Semana (Paisaje palmero biodiverso) 2018 y el encuentro virtual Colombia Palmera en línea ([Cenipalma, 2020a](#)), como complemento de información secundaria. Para analizar la información, se empleó la codificación descriptiva y abierta basada en observación, entrevistas y recolección de documentos ([Given, 2012](#)).

Tabla 2. Número de entrevistas semiestructuradas aplicadas

Zona	Departamentos ¹	Agentes comerciales	Agentes no comerciales
Centro	Antioquia (sur), Bolívar (sur), Caldas, Cesar, Cundinamarca, Norte de Santander y Santander.	19	1
Oriental	Meta, Cundinamarca, Casanare, Vichada y Arauca.	12	1
Norte	Antioquia (norte), Atlántico, Bolívar (norte), Cesar, Chocó, Córdoba, La Guajira, Sucre y Magdalena	13	
Suroccidental	Nariño, Caquetá y Cauca	7	3
Otras fuentes en eventos			9
Total		51	14

Nota: elaboración a partir de [Fedepalma \(2022c\)](#).

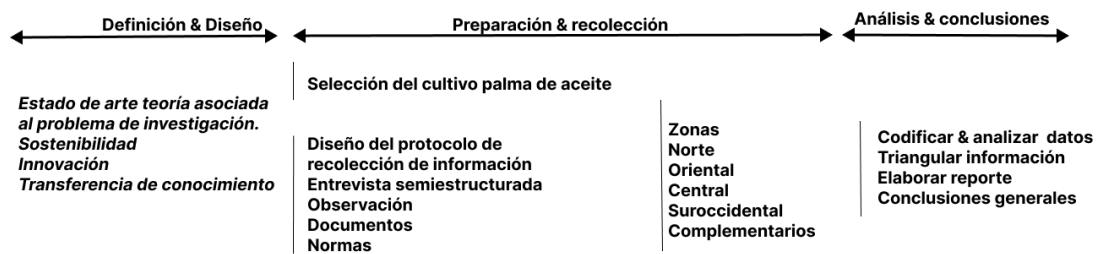


Figura 2. Fases del desarrollo del estudio de caso

Nota: elaborada a partir de los criterios establecidos por [Stake \(1995\)](#) y [Yin \(2013\)](#).

Finalmente, se analizaron e interpretaron los resultados arrojados por las encuestas e información secundaria recopilada; proceso que consistió en depurar y categorizar la información compilada, a fin de comprender de manera holística el caso, producir conclusiones y aportar elementos a la productividad del sector. Como herramienta de apoyo se utilizó el software Nvivo ([QSR International, 2021](#)), el cual permite trabajar en cualquier tipo de formato y realizar consultas simples, avanzadas y personalizadas, a la base de datos constituida desde las entrevistas.

Análisis de la generación, validación y apropiación de conocimiento

Inicialmente, los agentes interactúan de manera formal e informal de diversas maneras, directa o a través de redes sociales, para desarrollar conocimientos, adoptar nuevas prácticas o construir mecanismos conjuntos que facilitan el acceso e integración del conocimiento; todo esto con el objetivo de mejorar sus capacidades en el marco de un mecanismo de especialización permanente.

En particular, la estructura productiva está conformada principalmente por los núcleos palmeros, que al estar integrados por los productores se convierten en uno de los agentes fundamentales en la transmisión de conocimiento, porque, además de identificar diferentes necesidades y problemas del sector, generan soluciones y proponen nuevos desarrollos. Esta información es recopilada por las Unidades de Asistencia y Auditoría Técnica, Ambiental y Social (UAATA), las cuales interactúan con otras (cada núcleo palmero hace parte de una UAATA), usuarios de subproductos del oleaginoso, centros de formación e investigación, proveedores, laboratorios, otros sectores industriales y organizaciones potenciales entrantes al sector que están conectadas e integradas a través de Cenipalma y, de manera secundaria, con otros agentes que forman parte del sistema sectorial de transferencia de conocimiento.

En este contexto, la información es recopilada por las UAATA y transferida a Cenipalma, quien la analiza para priorizar las necesidades del sector e iniciar procesos de investigación, innovación y desarrollo de bienes o servicios, actividad que se ejecuta a través de nuevas tecnologías o métodos de trabajo en finca, y son utilizados por los agricultores quienes finalmente definen la dinámica de adopción tecnológica (Mak (2011)); esta implementación representa un reto para el sector agrícola (Ramírez, 2016, Ruge y Pérez, 2017). Es de resaltar que aquí Cenipalma no actúa de forma aislada, porque también ofrece alternativas permanentes de capacitación a través de diferentes convenios que suscribe con agentes como el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Ministerio de Agricultura y universidades, entre otros.

Como se evidencia, el proceso de extensión utilizado por Cenipalma a través de las UAATA se orienta a facilitar y transferir tecnologías, procedimiento que consiste en realizar un análisis particular del cultivo e identificar variables críticas que lo estén afectando, y elaborar de forma conjunta entre agricultor y Cenipalma un plan priorizado de intervención. Sin embargo, esto no parece ser lo suficientemente satisfactorio, debido a que existen vacíos en la recopilación, análisis y transferencia del conocimiento.

Otra de las prioridades del sector agrícola, en general, y palmífero, en particular, como base de su ventaja competitiva, es establecer la aptitud de las tierras para su cultivo, por lo que es necesario adelantar análisis orientados a planificar el uso eficiente del suelo. Esta labor es realizada por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), la cual, a partir de dos metodologías desarrolladas en forma conjunta con la Universidad Nacional de Colombia, identifica alternativas productivas. La primera se denomina “evaluación de tierras para

la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional” (MADR, 2014a), que incluye criterios de tipo biofísico, sociales, económicos y ambientales; y la segunda evalúa las tierras con fines agropecuarios a escala semidetallada (MADR, 2014b), por medio de un análisis jerárquico con criterios cualitativos. A partir de este, se establecen escenarios para estudiar futuros probables en el desarrollo del cultivo y su incidencia social, económica y ambiental; ello facilita la toma de decisiones de posibles proyectos en el sector. Con dichas metodologías se pueden direccionar políticas para determinar una escala de aptitudes de las zonas de cultivo (alta, media, baja); así se contribuye a minimizar el riesgo del inversionista y a incrementar la competitividad del sector (UPRA, 2021b). Esta información es asequible a los palmicultores a través de la página web (sipra.upra.gov.co), y de mecanismos de socialización en los congresos palmeros, reuniones de núcleos y publicaciones especializadas del gremio.

De otra parte, Agrosavia desde sus centros de investigación desarrolla los denominados materiales híbridos interespecíficos, que se obtienen del cruce entre palmas americanas y africanas, desarrollos que han generado palmíferos de mayor tolerancia y resistencia a las enfermedades, aspecto que aporta a la productividad del sector (Bastidas *et al.*, 2020).

Como se ha mencionado, en el sector interactúan las universidades y los centros de investigación, quienes conforman redes interdisciplinarias con énfasis en el fomento de la investigación, desarrollo e innovación. Durante el periodo 2012-2022, las investigaciones de estos agentes se concentraron en dos grandes áreas: a) investigaciones asociadas a la polinización de plantas, rendimiento y problemas fitosanitarios (Castillo *et al.*, 2022, Pena *et al.*, 2022); y el área de ingeniería química (Bohórquez *et al.*, 2022, Sánchez *et al.*, 2022), específicamente sobre el estudio de obtención de biodiésel, formación de hidratos y la producción de nuevos materiales y energía a partir de biomásas (Montes-Bazurto *et al.*, 2022, Orozco *et al.*, 2022), entre otros.

Otro agente no comercial vinculado al sector desde interacciones formales es el SENA, entidad que proporciona alternativas de integración de conocimiento y desarrollo de capacidades, a través de los convenios con Fedepalma, intervención que contribuye a evaluar la pertinencia de la ejecución de programas de innovación y desarrollo tecnológico, y certificación de capacidades laborales. En este sentido, el SENA desempeña un rol notable en la formación del recurso humano, principalmente a través de programas como los de técnico profesional en producción de aceite de palma y el de tecnólogo en gestión de plantaciones de palma de aceite (SENA, 2022a).

Aspectos medioambientales

En términos de sostenibilidad medioambiental, los sistemas de certificación han adquirido un rol importante como una herramienta de gestión de impacto medioambiental que puede ser utilizada como mecanismo para incrementar la ventaja competitiva de un sector productivo (Furumo *et al.* (2020)). La implementación de estos sistemas implica el desarrollo de me-

canismos de innovación tecnológica y de gestión de la cadena productiva, para así mejorar los niveles de productividad. Para el caso del sector palmicultor colombiano, se encontraron tres normativas medioambientales específicas que son implementadas: RSPO, RAC, ISCC. En el caso de la Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO), sus agentes están interesados en desarrollar e implementar estándares mundiales para la fabricación del oleaginoso bajo los lineamientos de la sostenibilidad integral (RSPO, 2018), Por su parte, la RAC busca certificar el desarrollo de una agricultura sostenible en las comunidades, en pro de la conservación de la biodiversidad, respeto de derechos laborales y buenas prácticas agrícolas (Rainforest Alliance, 2020). Mientras que la ISCC, propende por una producción sostenible de biomasa y biocombustibles a lo largo de la cadena de valor, para reducir la emisión de gases efecto invernadero (TUV, 2022).

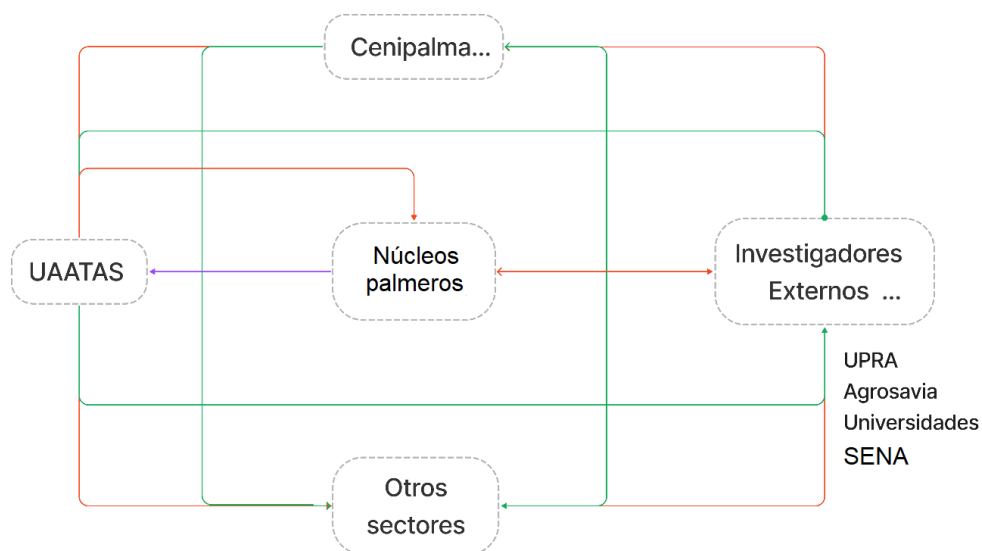
En el contexto agrícola, los programas de certificación voluntaria se han constituido en un medio para mejorar las prácticas de manufactura (Fascinetto-Bárcena *et al.*, 2021, Furumo *et al.* (2020), Kubo, 2021), proceso que en Colombia ha venido avanzando. Aunque es indudable el potencial que tiene para el sector palmicultor la implementación de estas tres normativas, existe aún una amplia limitación en cuanto a su cobertura. En este sentido, el nivel de fabricación de palma de aceite en Colombia con certificación es relativamente bajo y está concentrado en una de las certificaciones; asó, solo se registra que tan solo el 30 % de la producción total del oleaginoso está certificada y, de este total certificado, el 85 % está bajo la norma RSPO (RSPO, 2018), 12 % con la RAC y el 3 % con la ISCC (Fedepalma y Cenipalma, 2010). Desde la perspectiva de los agentes del sector, este bajo nivel de certificación obedece principalmente a los altos costos asociados a su implementación, lo que se convierte en una barrera para alcanzar los objetivos de certificación del sector.

RESULTADOS

Este trabajo analiza cómo interactúan los principales agentes del sector palmicultor colombiano, para así comprender sus dinámicas internas y las restricciones que estos enfrentan, y además de lograr su sostenibilidad.

Las dinámicas y relaciones entre agentes para la transferencia de conocimiento del sector palmicultor colombiano se muestran en la figura 3, las cuales no se pueden describirse de forma aislada, por lo que es necesario ejecutar un análisis holístico del sistema de transferencia de conocimiento, que se asemeja al del ciclo de aprendizaje de Kolb (1984).

En concomitancia con Malerba, 2002, la innovación es un acontecimiento sistémico resultado de la interacción entre diferentes actores. En el sector palmicultor colombiano se observa un flujo de información entre agentes mercantiles y no mercantiles que interactúan, quienes, a partir de conocimientos específicos, buscan constituir un sector más sostenible como com-



Incorpora desarrollos, investigaciones, innovaciones de otros sector para su beneficio, transfiere tecnología y conocimiento para beneficio de otros sectores.

Convenciones

- Producción de conocimiento & tecnología & Retroalimentación
- Retroalimentación
- Retroalimentación & Expresa necesidades

Figura 3. Modelo conceptual de transferencia de conocimiento

petitivo. Para ello, identifican problemas y desarrollan soluciones en red a partir de diferentes procesos de innovación, de tal manera que estas puedan ser aplicadas a variables que inciden en la competitividad y sostenibilidad del sector (Rodríguez *et al.*, 2021).

Danso-Abbeam *et al.*, 2018, sostienen que los programas de extensión agrícola tienen como objetivo difundir información sobre tecnologías agrícolas, transferir conocimientos, técnicas y contribuir con la gestión agrícola, a fin de incrementar su productividad. Para los palmicultores, una consideración importante son las diferentes relaciones que se dan en el sector, no solo como un proceso de generación y adaptación de nuevas tecnologías sino como la aplicación de sistemas de extensión, los cuales tienen que ver con la creación de una nueva forma de hacer las cosas y de transmitir el conocimiento. Se observa que tanto el sector como los autores citados coinciden en la importancia de la transferencia de conocimiento como mecanismo para alcanzar la sostenibilidad.

Pratiwi y Suzuki (2017), comprobaron que la conformación de redes de asesoramiento es importante para apoyar las actividades agrícolas e incrementar su productividad; por su parte, Yang y Tang (2003), afirman que los enfoques de las redes sociales influyen en el comporta-

miento de un individuo. En el sector palmicultor y como resultado del estudio, se encontró que los núcleos palmeros son el principal agente de transferencia, validación y apropiación del conocimiento; de allí se originan los principales procesos de apoyo en la generación de ideas y la creación de sus respectivos criterios de validación. Así, los núcleos palmeros comparten información orientada a mejorar las prácticas agrícolas, la productividad de los cultivos y a analizar los diversos problemas que surgen en la cadena, dinámica que conduce a una mejor comprensión de los problemas y a su intervención; además se fortalece el trabajo en equipo y se induce a la necesidad de la implementación de buenas prácticas agrícolas, como una herramienta para el fortalecimiento del núcleo.

Adicionalmente, el modelo de transferencia de conocimiento concebido para el sector palmicultor ha tenido como objetivo contribuir con la viabilidad económica y ambiental; en consecuencia, se ha generado una red de diferentes agentes entre quienes coexiste una interacción compartida de investigación, desarrollo e innovación (I+D+I), que ha permitido la coevolución de los actores involucrados en las diferentes fases que conforman la cadena de valor. Dichos actores están en una interacción continua, en la cual reciben apoyo por parte de profesionales y expertos de distintas disciplinas, quienes realizan aportes de gran utilidad para mejorar el desempeño y retroalimentación del sistema. Así, se evidencia una articulación vertical de transferencia de conocimiento desde la fabricación primaria, pasando luego a las etapas de postcosecha y procesamiento de fruto de palma. Esto genera valor desde la apropiación de resultados de investigación agropecuaria y la difusión de conceptos de buenas prácticas agrícolas por parte de los diferentes agentes que interactúan, con el propósito de orientar al sector hacia una producción más sostenible.

Zaika y Gridin (2019), evaluaron la importancia de la formación del recurso humano como estrategia hacia el desarrollo del potencial creativo e innovador, soportado en la base del conocimiento, y sostienen que este recurso es un factor sustancial en el progreso de la economía agraria. En el sector palmífero colombiano, la formación se ha transformado en fuente de ventaja competitiva, y permitido cerrar algunas de las brechas tecnológicas existentes a partir de una mejora y potencialización de las competencias laborales. No obstante, los análisis del presente estudio permiten inferir que dicha formación se ha dado de manera aislada y en cierta forma excluyente y focalizada, hacia un grupo reducido de actores del sector. En este sentido, no existe una política general ni una estrategia de formación específica que busque impulsar la transferencia del conocimiento en su recurso humano de manera generalizada a todos los participantes en la cadena de valor, situación que limita de alguna manera el desarrollo de ventajas competitivas sostenibles desde la actualización de competencias y autorrealización de los individuos en el contexto del sector.

Sin embargo, es indudable que la transferencia de conocimiento es un componente fundamental para el desarrollo del sector palmicultor; se evidencian algunas diferencias en términos regionales y del tamaño de las unidades productivas en dicha transferencia. Esto se determi-

na a partir de la percepción que tienen algunos productores, quienes consideran que no hay un compromiso de Cenipalma con los pequeños palmicultores, quienes dadas sus limitaciones logísticas y de recursos tienen barreras en el acceso a la asistencia técnica.

De otro lado, en algunas zonas se presentan diferentes formas de gobernanza, siendo una de ellas la de mercado, tanto oferentes como demandantes son libres de realizar las actividades de compraventa sin compromisos contractuales y vínculos de fidelidad con los núcleos. Situación por la cual el agricultor puede considerarse un nómada que no pertenece a un núcleo específico y no recibe capacitación sobre buenas prácticas agrícolas, lo que trae como resultado que problemas de carácter productivo o fitosanitario se puedan agravar y afectar a otros cultivos, alterando la productividad en una o varias regiones.

[Dar et al. \(2019\)](#), analizan el uso de parcelas demostrativas como estrategia de transferencia de conocimientos en el sector agrícola, la cual ha resultado eficaz, y ha demostrado una mejora en los conocimientos de los agricultores sobre nuevas técnicas. Los análisis realizados permitieron establecer que aún existen vacíos en los métodos de transferencia, validación y apropiación de conocimiento que se generan por las diferencias entre la forma en que operan los denominados campos experimentales que pertenecen a Cenipalma y las parcelas demostrativas que son propiedad de los núcleos palmeros.

Si bien en los campos experimentales se cuenta con recursos suficientes para realizar pruebas, observar e identificar las causas de cambio obtenidos desde la implementación de las diferentes formas de conocimiento; en las parcelas demostrativas la situación es diferente ya que, en la mayoría de los casos, no se cuenta con los recursos necesarios para validar estas pruebas con la rigurosidad necesaria por parte del agricultor. En esta dirección, [Sseguya et al. \(2021\)](#), afirman que el fortalecimiento de este tipo de estrategias es fundamental para mejorar el uso de los insumos agrícolas, implementar buenas prácticas agrícolas, facilitar el acceso a mercados a partir de procesos continuos de mejora de la calidad, la información y el conocimiento.

[Furumo et al. \(2020\)](#), investigaron sobre los resultados de la implementación de certificación en las prácticas de gestión de los pequeños agricultores de palma de aceite en Colombia, y hallaron que los palmicultores certificados realizan mejores prácticas ambientales, sustituyen fertilizantes sintéticos por orgánicos, entre otros. Sin embargo, desde los resultados del presente trabajo se evidenció que, aunque se ha adelantado en la implementación de certificaciones medioambientales como mecanismos de mejoramiento de la competitividad en el sector palmicultor, aún queda mucho por hacer en términos de la generación de mecanismos de financiación que les permitan a los pequeños y medianos productores seguir las normas, dinámica que debe estar acompañada de difusión y reconocimiento de las ventajas potenciales que se generarían con este ejercicio.

CONCLUSIONES

Desde su perspectiva conceptual y empírica, los modelos de transferencia de conocimiento son una herramienta fundamental en la difusión e incorporación de prácticas innovadoras a nivel productivo y de gestión. Estas conducen a una mejora en los objetivos de mediano y largo plazo de las organizaciones.

Las múltiples interacciones entre los diferentes agentes del sector palmicultor colombiano permiten inferir que el modelo de transferencia de conocimiento asociado a este se caracteriza por ser más colaborativo que competitivo. Lo anterior ha impactado de manera positiva en la confianza entre los agentes, y ha dinamizado la creación de nuevo conocimiento y su aplicación directa en la cadena de producción, lo que ha conducido a mejorar la eficiencia de la innovación.

A partir del análisis, es posible afirmar que Cenipalma cumple un papel importante en el modelo de transferencia de conocimiento del sector palmicultor colombiano, como agente centralizador, porque coordina y genera relaciones de confianza, cooperación y reciprocidad, principalmente con los núcleos palmeros en los diferentes procesos de transferencia de conocimiento desarrollado por los otros agentes, lo que finalmente contribuye a un mejoramiento continuo en las buenas prácticas agrícolas, las relaciones sociales y una reducción en los costos de producción.

Es importante resaltar que, aunque el modelo de transferencia de conocimiento del sector palmicultor colombiano muestra una interacción permanente entre los agentes, al producir una retroalimentación coordinada y permanente de la innovación, y al implementar diferentes actividades de la cadena de valor, su alcance es limitado y en algún sentido discriminatorio a nivel del productor individual, ya sea por factores de recursos o de localización geográfica. En algunos casos los pequeños agricultores por falta de recursos económicos no pueden acceder a nuevas tecnologías y, en otros, ellos están en regiones apartadas geográficamente, sin acceso a este tipo de soluciones.

Por otro lado, si bien las universidades han tenido un importante rol dentro del modelo de transferencia de conocimiento en el sector palmicultor colombiano, este proceso es limitado, ya que sus investigaciones se han centrado en estudios, casi que exclusivamente, en áreas relacionadas con la biología y la química, las cuales, aunque son muy importantes, dejan de lado otras áreas de investigación que pueden tener un papel protagónico para el sector, como los sistemas de sostenibilidad integral, la gestión del cambio climático y los modelos de gobernanza.

Del mismo modo, aunque el uso de certificaciones medioambientales es el único mecanismo de transferencia de conocimiento a nivel global que se presenta entre los diferentes países productores de aceite de palma, explicado principalmente desde la necesidad de cumplir las normas medioambientales necesarias para hacer intercambios en el mercado mundial de este producto. Los altos costos asociados a los diferentes procesos de certificación medioambiental

son una limitante a la transferencia de conocimiento, por lo que es necesario diseñar un sistema de certificación regional orientado a pequeños y medianos palmicultores, en el que se tenga un intercambio de información para calcular la relación costo/beneficio de la aplicación de las normas y así poder ajustar su plan de financiación a estos resultados.

REFERENCIAS

- Agrosavia. (2022). *Qué hacemos*. <https://www.agrosavia.co/qu%C3%A9-hacemos> ↑Ver página 60
- Ambrosini, V. y Bowman, C. (2001). Tacit knowledge: Some suggestions for operationalization. *Journal of Management Studies*, 38(6), 811-829. <https://doi.org/10.1111/1467-6486.00260> ↑Ver página 56
- Bastidas, S., Reyes, R., Tolosa, W., Darith, Y., Gutiérrez, I., Arenas, I., Moreno, L. y Arizala, M. (2020). *Híbrido interespecífico O × G Corpoica Elmira de palma de aceite Una alternativa de producción para zonas*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.brochure.7403800> ↑Ver página 63
- Baxter, M., Benor, D. y Harrison, J. (1984). Agricultural extension. *The training and visit system*. The World Bank. ↑Ver página 57
- Beltrán, J., Guerrero, J., Mosquera, M. y Pulver, E. (2015). Cerrando brechas de productividad con la estrategia de transferencia de tecnología productor a productor. *Palmas*, 36(2), 39-53. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11076> 56
↑Ver página
- Bohórquez, W., Orjuela, A., Narváez, P., Cadavid, J. G. y García-Nunez, J. (2022). Experimental optimization during epoxidation of a high-oleic palm oil using a simplex algorithm. *Industrial Crops and Products*, 187, 115321. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115321> ↑Ver página 63
- Bouzon, M., Staudt, F., Taboada, C. M. y Espíndola, J. C. (2012, agosto 15-17). *A framework towards a sustainable development in supply chain* [ponencia]. 9es Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique, Quebec, QC, Canadá. <https://doi.org/10.13140/2.1.2183.1048> ↑Ver página 55
- Castillo, S., Rodríguez, M., González, L., Zúñiga, L., Mestizo, Y., Medina, H., Montoya, C., Morales, A., Romero, H. y Sarria, G. (2022). Reply to Paterson, R. R. M. Comment on "Castillo et al. *Ganoderma zonatum* is the causal agent of basal stem rot in oil palm in Colombia. J.

- Fungi 2022, 8, 230". *Journal of Fungi*, 8(9), 945. <https://doi.org/10.3390/jof8090945> ↑Ver página 63
- Cenipalma. (2020a). XVI Reunión Técnica Nacional de Palma de aceite: Investigaciones e intercambio de experiencias, para afrontar los retos del sector. *Palma Sana*, 30, 1-8. <https://www.ica.gov.co/getattachment/ICAComunica/Infografias/Palma-Sana-30.pdf.aspx?lang=es-CO#:~:text=El%20COVID%2D19%20no%20logr%C3%B3,basados%20en%20la%20investigaci%C3%B3n%20continua> ↑Ver página 60
- Cenipalma. (2020b). *Colombia palmera en línea*. <http://web.fedepalma.org/colombia-palmera-enlinea-2020> ↑Ver página 56
- Cenipalma. (2022). ¿Qué es Cenipalma? [página web archivada]. Cenipalma. <https://web.archive.org/web/20221020054034/https://www.cenipalma.org/> ↑Ver página 60
- Coakes, E., Bradburn, A. y Sugden, G. (2004). Managing and leveraging knowledge for organizational advantage. *Knowledge Management Research & Practice*, 2(2), 118-128. <https://doi.org/10.1057/palgrave.kmrp.8500030> ↑Ver página 56
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). *Conceptos básicos*. https://www.dane.gov.co/files/inf_geo/4Ge_ConceptosBasicos.pdf ↑Ver página 59
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2021). *Historicos - Producto interno bruto (PIB)*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/historicos-producto-interno-bruto-pib> ↑Ver página 59
- Danso-Abbeam, G., Ehiakpor, D. y Aidoo, R. (2018). Agricultural extension and its effects on farm productivity and income: Insight from Northern Ghana. *Agriculture and Food Security*, 7(74). <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0225-x> ↑Ver página 65
- Dar, M., Janvry, A., Emerick, K., Kelley, E. y Sadoulet, E. (2019). *The impact of demonstration plots on adoption of new rice varieties in Bangladesh*. J-Pal. <https://www.povertyactionlab.org/evaluation/impact-demonstration-plots-adoption-new-rice-varieties-bangladesh> ↑Ver página 67
- Denzin, N. (1970). *Sociological methods. A sourcebook*. (1.^a ed.). Taylor & Francis Group. ↑Ver página 60
- Dirimanova, V. y Radev, T. (2017). The knowledge transfer in the agricultural sector in South-Central region of Bulgaria. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 23(3), 505-511. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173238825> ↑Ver página 56

- FAO/STAT. (2022, junio). *Cultivos y productos de ganadería* [base de datos]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> ↑Ver página 58
- Fascinetto-Bárcena., G., Méndez-Cadena., M., Ocampo-Fletes., I. y López-Sánchez., H. (2021). Knowledge and actions of young people living in rural territories and facing environmental problems. *Tecnura*, 25(68), 125-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.15775> ↑Ver página 64
- Fedepalma. (2019). *Anuario estadístico 2019. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia*. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1452/La%20agroindustria%20de%20la%20palma%20de%20aceite%20en%20Colombia%20y%20en%20el%20mundo%202014-2018> ↑Ver página
- Fedepalma. (2022a). *Localización geográfica de cultivos y plantas de beneficio*. <http://sispa.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/destacados> ↑Ver página 58
- Fedepalma. (2022b). *Evolución histórica anual de tasa de extracción aceite de palma*. <http://sispa.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/produccion> ↑Ver página 58
- Fedepalma. (2022c). *Exportaciones anuales de aceites y grasas*. <http://sispa.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/exportaciones> ↑Ver página 61
- Fedepalma y Cenipalma. (2010). *Unidades de asistencia y auditoría técnica, ambiental y social (Uaata) en núcleos palmeros*. <https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2018/12/Cartilla-UAATAS.pdf> ↑Ver página 60, 64
- Foo, D. y Aziz, M. (eds.). (2019). *Green technologies for the oil palm industry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2236-5> ↑Ver página 58
- Foster, A. y Rosenzweig, M. (1995). Learning by doing and learning from others: Human capital and technical change in agriculture. *Journal of Political Economy*, 103(6), 1176-1209. <https://doi.org/10.1086/601447> ↑Ver página 57
- Franzel, S., Wambugu, C., Nanok, T. y Coe, R. (2013). The 'model farmer' extension approach revisited: are expert farmers effective innovators and disseminators? *Proceedings of the Conference on Innovations in Extension*. <https://www.worldagroforestry.org/publication/themodel-farmer-extension-approach-revisited-are-expert-farmers-effective-innovators>. ↑Ver página 56
- Furumo, P., Rueda, X., Rodríguez, J. Y Parés, I. (2020). Field evidence for positive certification outcomes on oil palm smallholder management practices in Colombia. *Journal of Cleaner*

- Production*, 245, 118891. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118891> ↑Ver página 63, 64, 67
- Given, L. M. (ed.). (2012). *The Sage encyclopedia of qualitative research methods*. Sage Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412963909> ↑Ver página 60
- Glasbergen, P. (2011). Understanding partnerships for sustainable development analytically: The ladder of partnership activity as a methodological tool. *Environmental Policy and Governance*, 21(1), 1-13. <https://doi.org/10.1002/eet.545> ↑Ver página 59
- Havlin, J., Shroyer, J. y Devlin, D. (1990). *Establishing on-farm demonstration and research plots*. Kansas State University. Cooperative Extension Service. <https://bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF966.pdf> ↑Ver página 57
- Kolb, D. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice Hall. https://www.researchgate.net/publication/235701029_Experiential_Learning_Experience_As_The_Source_Of_Learning_And_Development ↑Ver página 57, 64
- Kubo, H., Darmawan, A., Hendarto, A. y Mader, D. (septiembre de 2021). The effect of agricultural certification schemes on biodiversity loss in the tropics. *Biological Conservation*, 261, 109243. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109243> ↑Ver página 64
- Lambert, D., García-Dastugue, S. y Croxton, K. (2005). An evaluation of process-oriented supply chain management frameworks. *Journal of Business Logistics*, 26(1), 25-51. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2005.tb00193.x> ↑Ver página 55
- Lesage, C., Cifuentes-Espinosa, J. y Feintrenie, L. (2021). Oil palm cultivation in the Americas: Review of the social, economic and environmental conditions of its expansion. *Cahiers Agricultures*, 30, 27. <https://doi.org/10.1051/cagri/2021015> ↑Ver página 56
- Lubell, M., Hillis, V. y Hoffman, M. (2011). Innovation, cooperation, and the perceived benefits and costs of sustainable agriculture practices. *Ecology and Society*, 16(4), 23. <https://doi.org/10.5751/ES-04389-160423> ↑Ver página 57
- Machado, C. y Davim, P. (2014). *Transfer and Management of Knowledge*. Wiley. ↑Ver página 56
- Mak, S. (2001). Continued innovation in a Cambodian rice-based farming system: Farmer testing and recombination of new elements. *Agricultural Systems*, 69(1-2), 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00022-1) ↑Ver página 57, 62
- Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31(2), 247-264. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1) ↑Ver página 64

- Michalos, A. (2017). Building the encyclopedia of quality of life and well-being research. En *Connecting the quality of life theory to health, well-being and education* (pp. 335-346). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51161-0_16 ↑Ver página 56
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2014a). *Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional. Metodología a escala general* (1:100000). <http://hdl.handle.net/11438/8491> ↑Ver página 63
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2014b). *Metodología de evaluación de tierras* 1:25 000. https://www.upra.gov.co/documents/10184/13821/Metodología_evaluación_tierras/8d9f4e73-7d7b-4a7e-96d0-3c7283f6a00e?version=1.1 ↑Ver página 63
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2020). *Cadena de palma de aceite. Indicadores e instrumentos*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Palma/Documentos/2020-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf> ↑Ver página 59
- Montes-Bazurto, L., Bustillo-Pardey, A. y Morales, A. (2022). New alternative to control *Stenoma impressella* (Lepidoptera: Elachistidae) using *Bacillus thuringiensis* commercial formulations in oil palm crops. *Agronomy*, 12(4), 883. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040883> ↑Ver página 63
- Musa, Y. N., Aboki, E. y Audu, I.A. (2013). The limitations and implications of training and visit (T&V) extension system in Nigeria. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 4(1), 67-76. <https://infinitypress.info/index.php/jas/article/view/214> ↑Ver página 56
- Montoya, J., Valdés, C., Chaquea, H., Brennan, M. y Chejnea, F. (2020). Surplus electricity production and LCOE estimation in Colombian palm oil mills using empty fresh bunches (EFB) as fuel. *Energy*, 202, 117713. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117713> ↑Ver página 57
- Navarrete, Z. (2013). La universidad como espacio de formación profesional y constructora de identidades. *Universidades*, (57), 5-16. <https://www.redalyc.org/pdf/373/37331246003.pdf> ↑Ver página 60
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana. ↑Ver página 59
- Nonaka, I., Toyama, R. y Konno, N. (2000). SECI, Ba and leadership: A unified model of dynamic knowledge creation. *Long Range Planning*, 33(1), 5-34. [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(99\)00115-6](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(99)00115-6) ↑Ver página 55
- Orozco, L., Cardeño, F., Echeverri, D. y Ríos, L. (2022). Renewable diesel from palm oil using bio-syngas from palm empty fruit bunches as a hydrogen source. *Chemical Engineering & Technology*, 45(7), 1281-1289. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200138> ↑Ver página 63

- Pasaribu, B., Afrianti, A., Gumilar, G., Rizanti, H. y Rohajawati, S. (2017). Knowledge transfer: A conceptual model and facilitating feature in start-up business. *Procedia Computer Science*, 116, 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.10.052> ↑Ver página 56
- Pena, A., Tejada, J. C., Gonzalez-Ruiz, J. D. y Gongora, M. (2022). Deep learning to improve the sustainability of agricultural crops affected by phytosanitary events: A financial-risk approach. *Sustainability*, 14(11), 6668. <https://doi.org/10.3390/su14116668> ↑Ver página 63
- Poh, P., Wu, T., Lam, W., Poon, W. y Lim, C. (2020). *Waste management in the palm oil industry. Plantation and milling processes*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39550-6> ↑Ver página 57
- Porter, M. (1987). *Ventaja competitiva: creación y sostenimiento de un desempeño superior* (1.ª ed.). Grupo Editorial Patria. ↑Ver página 55
- Pratiwi, A. y Suzuki, A. (2017). Effects of farmers' social networks on knowledge acquisition: Lessons from agricultural training in rural Indonesia. *Journal of Economic Structures*, 6(8). <https://doi.org/10.1186/s40008-017-0069-8> ↑Ver página 65
- ProduccionAgricolaMundial.com. (septiembre de 2022). *Producción mundial aceite de palma 2022/2023*. <http://www.produccionagricolamundial.com/cultivos/aceitedepalma.aspx> ↑Ver página 57, 58
- QSR International. (2021). *Nvivo: O software n 1o para análise qualitativa de dados*. <https://www.qsrinternational.com/nvivo-qualitative-data-analysis-software/about/nvivo> ↑Ver página 61
- Rainforest Alliance. (2020). *What does "Rainforest Alliance Certified" mean?* <https://www.rainforest-alliance.org/insights/what-does-rainforest-alliance-certified-mean/> ↑Ver página 60, 64
- Ramírez, M. (2016). Innovación inclusiva, desarrollo de capacidades y redes sociales en clústeres emergentes. *Revista Palmas*, 37(esp.), 151-158. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11899/11892> ↑Ver página 62
- Ritchie, H. y Roser, M. (2021). *Palm oil. Our world in data*. <https://ourworldindata.org/palm-oil> ↑Ver página 57
- Rodríguez, A., López-García, D., Carvajal-Quintero, S. y Arango, A. (2021). A comprehensive review of sustainability in isolated Colombian microgrids. *Tecnura*, 25(70), 126-145. <https://doi.org/10.14483/22487638.18619> ↑Ver página 65

- Romańczyk, Z., Janc, K. y Czapiewski, K. (2012). The importance and diffusion of knowledge in the agricultural sector: The Polish experiences. *Geographia Polonica*, 85(1), 45-56. <https://doi.org/10.7163/GPOL.2012.1.4> ↑Ver página 56
- Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). (2018). *Interpretación nacional para Colombia del estándar RSPO 2018 de principios y criterios (P&C) para la producción de Aceite de Palma Sostenible*. Grupo Técnico de Trabajo de la Interpretación Nacional Colombiana. <https://web.fedepalma.org/sites/default/files/documento-consultaINpara%20ColombiaRSPO%20PC2018.pdf> ↑Ver página 64
- Ruge, L. y Pérez, J. (2017). Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela. *Tecnura*, 21(52), 130-147. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a10> ↑Ver página 62
- Russell, M. (febrero de 2018). *Palm oil: Economic and environmental impacts*. European Parliamentary Research Service. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2018/614706/EPRS_ATA\(2018\)614706_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2018/614706/EPRS_ATA(2018)614706_EN.pdf) ↑Ver página 56
- Sánchez, D., Saldarriaga, J. y Caro, S. (2022). Chemical and thermodynamic properties of palm oil-based materials and their impact on recycled binder blends. *Construction and Building Materials*, 348, 128490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128490> ↑Ver página 63
- Sanz, J. (2016). Pudrición del cogollo: enfrentamiento integral contra un enemigo letal, P. palmivora. *Palmas*, 37(especial tomo 1), 109-114. http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/MemoriasdelaXVIIIConferenciaInternacionalsobrePalmadeaceite/M_1_1_Pudriciondelcogolloenfrentamientointegral.pdf ↑Ver página 56
- Selener, D., Chenier, J. y Zelaya, R. (1997). *Farmer-to-farmer extension: lessons from the field*. International Institute of Rural Reconstruction (IIRR). <https://edepot.wur.nl/425677> ↑Ver página 56
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2022a). *Cultivo palma de aceite*. <https://oferta.senasofiaplus.edu.co/sofia-oferta/detalle-oferta.html?fm=0&fc=NuaJQj7k8I0> ↑Ver página 63
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2022b). *Quiénes somos*. <https://www.sena.edu.co/es-co/sena/Paginas/quienesSomos.aspx> ↑Ver página 60
- Sensuse, D., Sucahyo, Y., Rohajawati, S. y Anggia, P. (26-28 de abril 2014). *Models and frameworks of knowledge management: A literature review* [presentación de conferencia]. International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, Sapporo, Japan. <https://doi.org/10.1109/InfoSEEE.2014.6947854> ↑Ver página 56

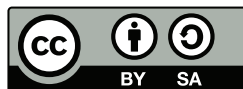
- Shaw, G. y Williams, A. (2009). Knowledge transfer and management in tourism organisations: An emerging research agenda. *Tourism Management*, 30(3), 325-335. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2008.02.023> ↑Ver página 56
- Sseguya, H., Robinson, D., Mwangi, H., Flock, J., Manda, J., Abed, R. y Mruma, S. (2021). The impact of demonstration plots on improved agricultural input purchase in Tanzania: Implications for policy and practice. *PLoS ONE*, 16(1), 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243896> ↑Ver página 67
- Stake, R. (1995). *Investigación con estudio de casos*. (2.^a ed.). Morata. <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Investigacion-con-estudios-de-caso.pdf> ↑Ver página 60, 61
- Statista. (2022). *Palm oil consumption worldwide from 2015/2016 to 2021/2022*. <https://www.statista.com/statistics/1023339/palm-oil-export-volume-worldwide/> ↑Ver página 58
- Tarasoff, C. (2016). *A guide to on-farm demonstration research how to plan, prepare, and conduct your own on-farm trials*. https://farmwest.com/wp-content/uploads/2020/09/Research_Manual_digital.pdf ↑Ver página 57
- Taylor, M. y Bhasme, S. (2018). Model farmers, extension networks and the politics of agricultural knowledge transfer. *Journal of Rural Studies*, 64, 1-10. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2018.09.015> ↑Ver página 57
- Trigo, E. y Elverdon, P. (2019). Los sistemas de investigación y transferencia de tecnología agropecuaria. *FAO*, (19), 1-18. <http://www.fao.org/3/ca5124es/ca5124es.pdf> ↑Ver página 56
- TÜV Rheinland. (2022). *International sustainability and carbon certification*. <https://www.tuv.com/world/en/iscc-international-sustainability-and-carbon-certification.html> ↑Ver página 60, 64
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2021a). *Evaluación de tierras: zonificación*. <https://www.upra.gov.co/uso-y-adequacion-de-tierras/evaluacion-de-tierras/zonificacion#:~:text=Las%20zonificaciones%20elaboradas%20por%20la,y%20pesqueras%20de%20car%C3%A1cter%20productivo.> ↑Ver página 60
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2021b). *Mapa de aptitudes*. <https://sipra.upra.gov.co/#nacional> ↑Ver página 63
- Unilever. (2021). *Sustainable palm oil*. <https://www.unilever.com/planet-and-society/protect-and-regenerate-nature/sustainable-palm-oil/> ↑Ver página 56
- Wang, L., Li, S. y You, Z. (2020). The effects of knowledge transfer on innovation capability: A moderated mediation model of absorptive capability and network reliance. *Journal*

of High Technology Management Research, 31(1), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2020.100372> ↑Ver página 56

Yang, H. y Tang, J. (2003). Effects of social network on students' performance: A web-based forum study in Taiwan. *Journal of Asynchronous Learning Network*, 7(3), 93-107. <https://doi.org/10.24059/olj.v7i3.1848> ↑Ver página 65

Yin, R. (2013). *Case study research: Design and methods*. (5.ª ed.). Sage. ↑Ver página 60, 61

Zaika, S. y Gridin, O. (2019). Human capital development in the agricultural economy sector. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(4(51)), 30-36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.194444> ↑Ver página 66



Modelamiento de los niveles de contaminación en un tramo del río Sogamoso, mediante el acoplamiento de los métodos Lattice-Boltzmann y diferencias finitas

Simulation of pollution levels in a section of the Sogamoso River by coupling the Lattice -Boltzmann and Finite Differences methods

Alejandro Duitama Leal ¹, Valentina Mendoza Celedón ², Luis Alfredo Montes Vides ³,
Javier Hernán Gil Gómez ⁴ y Rodrigo Elías Esquivel ⁵

Fecha de Recepción: 2 de julio de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de septiembre de 2022

Cómo citar: Duitama-Leal, A., Mendoza-Celedón, V., Montes-Vides, L. A., Gil-Gómez, J. H., Esquivel, R. E. (2023). Modelamiento de los niveles de contaminación en un tramo del río Sogamoso, mediante el acoplamiento de los métodos Lattice-Boltzmann y diferencias finitas. *Tecnura*, 27(76), 78-95. <https://doi.org/10.14483/22487638.18226>

Resumen

Objetivo: El modelado de flujos y contaminantes enfrenta grandes desafíos que van desde la definición de geometrías complejas hasta la convergencia del algoritmo y la determinación de los parámetros del modelo. El método presentado aquí aborda este problema a través de una aplicación conjunta de los métodos de Lattice-Boltzmann y diferencias finitas. La solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes y advección-difusión permite simular los niveles de dispersión de la contaminación espaciotemporal en una fuente hídrica.

Métodología: El método resolvió las ecuaciones de Navier-Stokes a través de la propuesta de Lattice Boltzmann, que proporciona el campo vectorial de velocidades del fluido. La solución de la ecuación de difusión-advección por diferencia finita requiere este campo de velocidad conocido. La solución codificada en C++, primero digitaliza el mapa, etiqueta cada píxel del mapa como fluido o sólido. El código usa la imagen digital para configurar la geometría de la zona de flujo, luego simula la dinámica del fluido y la concentración del contaminante. La comparación entre las soluciones analíticas de modelos ideales advectivo- difusivo, y las obtenidas a través de este método, facilita la medición de la confiabilidad del método; aplicado a una sección del río Sogamoso (Colombia), el algoritmo arrojó la velocidad, la presión y la concentración del agente.

¹Doctor(c) en Geociencias, magíster en Ciencias Geofísica, físico. Investigador y docente Universidad El Bosque, Grupo Signos. Bogotá, Colombia. Email: duitamaalejandro@unbosque.edu.co

²Matemática. Docente de la Universidad El Bosque. Bogotá, Colombia. Email: vmendoza@unbosque.edu.co

³Doctor en Geofísica, magíster, físico. Investigador y docente Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Email: lamontesv@unal.edu.co

⁴Magíster en Matemáticas Aplicadas, especialista en Matemática Aplicada, licenciado en Matemáticas. Docente e investigador Universidad El Bosque, Grupo Signos. Bogotá, Colombia. Email: jgil@unbosque.edu.co

⁵Especialista en Vías, ingeniero civil. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Email: reesquivelr@udistrital.edu.co

Resultados: Se encontró que el término *advectivo* predomina en gran parte de cada uno de los tramos del río Sogamoso. Sin embargo, hay una sección en el tramo superior, en donde predomina la componente difusiva. Esto ocurre porque allí la velocidad es muy baja.

Conclusiones: Los resultados señalan la confiabilidad, estabilidad y robustez del método para simular fenómenos de advección-difusión en cuerpos con geometrías irregulares.

Palabras clave: Navier-Stokes, contaminación, advección, difusión, Lattice Boltzmann, diferencias finitas.

Abstract

Objective: The modeling of flow sand pollutants faces defiant challenges, ranging from the definition of complex geometries to the convergence of the algorithm and determination of the model parameters. The method presented here faces this problem through a joint application of the Lattice-Boltzmann methods and finite differences. The numerical solution of the both Navier-Stokes, and Advection - Diffusion equations allow simulating the spread levels of spatial and temporal contamination in a water source.

Methodology: The method solved the Navier-Stokes equations using the Lattice Boltzmann method, which provides the fluid velocities vector field. The solution of diffusion – advection equation by finite difference requires this known velocity field. The C++ encoded solution, first digitizes the map, labeling each pixel on the map as fluid or solid. The code uses the digital image to setup geometry the flow zone, then simulate the fluid dynamics and concentration of the contaminant. The comparison between the analytical solutions of ideal advective -diffusive models with the obtained through this method, allow the measurement of the method reliability. Applied to a section of the Sogamoso river - Colombia, the algorithm yielded the agent's velocity, pressure, and concentration.

Results: It was found that the advective term predominates in each of the sections of the Sogamoso River. However, there is a section in the upper section, where the difussive component predominates. This happens because there the speed very low.

Conclusions: The obtained results point out the reliability, stability, and robustness of the method to simulate advection-diffusion phenomena in bodies with irregular geometries.

Keywords: Navier-Stokes, advection, difussion, Lattice Boltzmann, finite difference.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	80
Ecuación de advección/difusión	81
Discretización	81
Ecuación de Navier-Stokes y el método de Lattice-Boltzmann	82
Metodología	84
Validación del método	85
Resultados	87
Conclusiones	93
Agradecimientos	93

INTRODUCCIÓN

La contaminación tiene un impacto significativo (Cortes Zambrano *et al.*, 2022, Cuadros Segura *et al.*, 2021, Moyano Salcedo *et al.*, 2021) en la gestión y el uso responsables de los recursos hídricos. Sin embargo, hace mucho tiempo el problema de la contaminación alcanzó una gran relevancia al sensibilizar a las personas para que fueran más responsables con el cuidado y uso de dichos recursos. Luego, en 2015, Naciones Unidas (ONU) aprobó diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la Agenda de Desarrollo 2030. Entre ellos, el objetivo 6 consiste en garantizar la disponibilidad de agua, gestión sostenible y saneamiento para todos. El modelado de los fenómenos relacionados con los flujos (contaminantes) presenta aún desafíos y dificultades, entre las cuales se encuentra –por citar algunas–, la consideración de geometrías complejas y la convergencia del algoritmo partir del conjunto de parámetros físicos del modelo (Chen y Doolen, 1998, Krüger *et al.*, 2017). Aunque estas dificultades definen el conjunto de ventajas y desventajas del método, nuevos avances significativos permiten establecer condiciones para simular sistemas que antes eran imposibles de modelar. El método Lattice-Boltzmann permite simular la dinámica de un fluido a partir de un conjunto de ecuaciones, de las cuales se deduce la ecuación de Navier-Stokes, teniendo en cuenta la conservación de las ecuaciones de masa y momento.

En esta dirección, un sistema acoplado 1D y 2D simuló flujos de agua poco profunda en sistemas fluviales y lacustres a gran escala. Los resultados, comparables con datos experimentales de perfiles de velocidad para diferentes tiempos de relajación, evidencian una adecuada aproximación a los fenómenos reales.

Como es de conocimiento, la velocidad es un parámetro asociado a la viscosidad del fluido en Lattice-Boltzmann. Un caso interesante es el planteado por Meng *et al.* (2020), y Parmigiani *et al.* (2013), quienes simularon una sección del río Ródano, en Ginebra (Suiza) con Lattice-Boltzmann, mediante el cálculo de perfiles de velocidad y el establecimiento de límites computacionales en modelos con geometría 3D. Una contribución significativa fue la inclusión de sedimentación y procesos de erosión a lo largo de la ribera. Otros investigadores (Liu *et al.*, 2015, Chen y Doolen, 1998) demostraron la fuerza del Lattice-Boltzmann para simular sistemas que permiten el cálculo del campo de velocidad en geometrías irregulares. En los fenómenos de difusión y advección de un contaminante, el campo de velocidad influye fuertemente en el comportamiento advectivo (Romero Suárez, 2011, García Sarmiento, 2019). Por tanto, la implementación de Lattice-Boltzmann para resolver la ecuación de Navier-Stokes proporciona una buena aproximación del campo de velocidad, según la geometría del río (Parmigiani *et al.* (2013)). Por otro lado, la solución por diferencias finitas puede modelar el proceso de difusión/advección. Finalmente, Bermúdez y Juárez (2014), y Ureña *et al.* (2009) analizaron la es-

tabilidad y condiciones de convergencia, y comprobaron numéricamente el error global, según el número de nodos y el aumento del tiempo de simulación. Otros trabajos, como el de (Chen y Doolen, 1998), y (Liu *et al.*, 2015) demostraron la fuerza del método de Lattice-Boltzmann para simular sistemas que permiten el cálculo del campo de velocidad en geometrías irregulares. En los fenómenos de difusión y advección de un contaminante, el campo de velocidad influye fuertemente en el comportamiento advectivo (García Sarmiento, 2019, Romero Suárez, 2011). Por consiguiente, la implementación de Lattice-Boltzmann para resolver la ecuación de Navier-Stokes proporciona una buena aproximación del campo de velocidades según la geometría del río (Parmigiani *et al.* (2013)). Por otro lado, la solución por diferencias finitas puede modelar el proceso de difusión/advección. Por último, Bermúdez y Juárez (2014), y Ureña *et al.* (2009) analizaron las condiciones de estabilidad y convergencia, y demostraron numéricamente el error global, según el número de nodos y el aumento del tiempo de simulación. Sus indicaciones garantizan la convergencia, ya que establece restricciones sobre algunos parámetros, así se evitan las inestabilidades asociadas a los modelos y discretización espaciotemporal.

Ecuación de advección/difusión

La ecuación de advección/difusión (ecuación (1)), describe el movimiento de partículas expuestas a un proceso difusivo, considerando el campo del vector de velocidad del fluido que los contiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C(\vec{r}, t) - \vec{u} C(\vec{r}, t) \quad (1)$$

C es la concentración (en porcentaje), D es el coeficiente de difusión en (m^2/s) el cual representa la capacidad de propagación del material en el líquido, \vec{r} es el vector posición en (m), \vec{u} es el vector velocidad del fluido en m/s . En la ecuación (1), $\nabla^2 C(\vec{r}, t)$ representa el término difusivo, y $\vec{u}\nabla C(\vec{r}, t)$, el término advectivo, que dependen del campo de velocidades del fluido.

Discretización

En la vecindad Δt de un punto t una función $f(t)$ se aproxima como:

$$f(t + \Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(t)\Delta t^n}{n!} \quad (2)$$

$$f(t - \Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(t)\Delta t^n}{n!} \quad (3)$$

La sustracción de las ecuaciones (2) y (3) y el truncamiento a $O(\Delta t)$ se obtiene la primera derivada:

$$f'(t) = \frac{f(t + \Delta t) - f(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (4)$$

Realizando el mismo procedimiento y el truncamiento a $O(\Delta t^2)$, se aproxima la segunda derivada:

$$f''(t) = \frac{f(t + \Delta t) - 2f(t) + f(t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (5)$$

Reemplazando la discretización de las ecuaciones (4) y (5) en la ecuación (1) se obtiene la ecuación (6):

$$C(t + \Delta t, x, y) = \left| \begin{array}{l} 2\Delta t \cdot D \left(\begin{array}{l} \left(\frac{C(t, x + \Delta x, y) + (-2C(t, x, y) + C(t, x - \Delta x, y))}{\Delta x^2} \right) + \left(\frac{C(t, x, y + \Delta y) + (-2C(t, x, y) + C(t, x, y - \Delta y))}{\Delta y^2} \right) \end{array} \right) \\ + \\ -u_x \left(\frac{C(t, x + \Delta x, y) - C(t, x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \right) \\ + \\ -u_y \left(\frac{C(t, x, y + \Delta y) - C(t, x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \right) \\ + \\ C(t - \Delta t, x, y) \end{array} \right| \quad (6)$$

La ecuación (6) permite simular la evolución del proceso difusivo advectivo, el cual requiere conocer el campo de velocidad en cada punto del fluido, estimado mediante el método Lattice-Boltzmann.

Ecuación de Navier-Stokes y el método de Lattice-Boltzmann

La ecuación de Navier-Stokes (ecuación (7)) describe el comportamiento de algunos fluidos debido a la conservación de la masa y el momento (Vazquez, 2004):

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{k} - \nabla P + \mu \left(\frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \nabla^2 \vec{u} \right) \quad (7)$$

ρ es la densidad del fluido (kg/m^3); \vec{u} el campo de velocidad (m/s); \vec{k} , aceleración creado por las fuerzas en el fluido; P , la presión del fluido (Pa), y μ , la viscosidad cinemática (m^2/s). Actualmente, no existe solución analítica de la ecuación Navier-Stokes, excepto en casos específicos, por lo que el método de Lattice-Boltzmann proporciona una solución numérica aproximada de gran utilidad. Es un enfoque de simulación reciente, aplicado a sistemas de fluidos complejos, que atrae a investigadores en física computacional. Este método simula la dinámica

de un fluido, resuelve el campo de flujo y lo discretiza en tiempo y espacio, pero sin hacer una discretización directa y explícita de la ecuación de Navier-Stokes. El método ofrece una ventaja numérica sobre otros, como diferencias finitas o volúmenes finitos (Krüger *et al.*, 2017). Además, modela geometrías complejas o condiciones de contorno variables en el tiempo y que son ampliamente utilizadas para simular fenómenos con fluidos. En lugar de intentar resolver la ecuación (7), Lattice-Boltzmann imita una densidad de fluido en una celda que sufre continuos flujos y colisiones. El modelo 2DQ9 usado en la figura 1 representa el conjunto de velocidades de partículas en una celda que interactúa con las de las celdas vecinas.

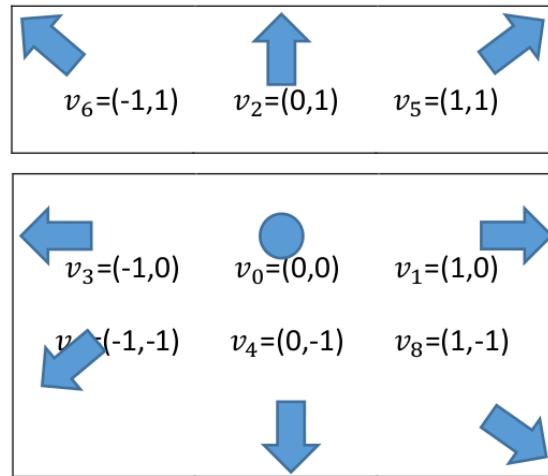


Figura 1. Modelo de velocidad 2DQ9 para Lattice Boltzmann

El *streaming step* determina la dirección para transferir información de la función de distribución f hacia cada celda vecina. En el *collision step*, las celdas vecinas envían información sobre f a esta celda (celda central). La velocidad en la figura 1 tiene pesos que dependen del número de dimensiones espaciales y del modelo de velocidad utilizado. Estos pesos son:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{4}{9} & \text{for } i = 0 \\ \frac{1}{9} & \text{for } i = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{1}{36} & \text{for } i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (8)$$

Los pesos miden la importancia estadística de la información de la celda para cada una de las celdas vecinas, dependiendo del modelo de velocidad utilizado (Krüger *et al.*, 2017). En las siguientes cantidades:

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \quad (9)$$

$$\rho \vec{u}(x, t) = \sum_i \vec{v}_i f_i(x, t) \quad (10)$$

$f_i(\vec{r}, t)$ es una función de distribución; ρ , la densidad de las partículas; $\rho\vec{u}$, el momento por unidad de volumen; $v_i = (v_{ix}, v_{iy})$, la velocidad de las partículas en un determinado instante y posición. La ecuación (11) es la función de equilibrio que calcula $f_i(\vec{r}, t)$, y es una aproximación en serie de Taylor de la función de distribución de velocidades de Boltzmann.

$$f_i^{eq}(x, t) = \begin{cases} w_i\rho \left[1 + 3(\vec{U}\vec{v}_i) + \frac{9}{2}(\vec{U}\vec{v}_i)^2 - \frac{3}{2}U^2 \right] & \text{para } i > 0 \\ w_0\rho \left(1 - \frac{3}{2}U^2 \right) & \text{para } i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

La ecuación de Boltzmann es (Chen y Doolen, 1998):

$$f_i(x + \Delta x, t + \Delta t) = f_i(x, t) + \Omega_i(x, t) \quad (12)$$

Ω_i es el operador de colisión. Esta investigación utilizó el operador Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) (Krüger et al., 2017):

$$\Omega_i(f) = -\frac{f_i - f_i^{eq}}{\tau} \Delta t \quad (13)$$

Donde τ es el tiempo de relajación, δt es el paso de tiempo entre dos procesos de *pasos de transmisión*. Finalmente, la ecuación de Boltzmann con el operador de colisión BGK (Bhatnagar Gross Krook) es:

$$f_i(\vec{x} + \Delta x, t + \Delta t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{(eq)}(\vec{x}, t)] + f_i(\vec{x}, t) \quad (14)$$

$f_i(\vec{r} + \Delta\vec{r}, t + \Delta t)$ es la función distribución de $t + \Delta t$; f_i^{eq} , la función de equilibrio dado por la ecuación (11), y $f_i(\vec{r}, t)$, la función de distribución de las partículas con velocidad v_i para cada tiempo (t).

El error al usar el método de diferencias finitas mezcla el error espacial con el temporal. El error espacial está en el orden de Δx^2 y el error en el tiempo está del orden del Δt^2 . Este ocurre por el truncamiento en los términos de la serie de Taylor. Las diferencias finitas son centradas, lo que permite mejorar el error y trabajarlo como parámetro, según la resolución espaciotemporal que se trabajó. Igualmente, se cumplen las condiciones de convergencia tanto para el modelamiento del campo de velocidades usando Lattice-Boltzmann, como para el modelamiento de la ecuación de difusión/advección. Con esto se garantiza que la propagación del error numérico no produce divergencias en los campos modelados (Krüger et al., 2017).

Metodología

La metodología completa incluye dos códigos: el primero digitaliza la geometría para definir las áreas donde se encuentran el fluido y la roca; el segundo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes por el método de Lattice-Boltzmann y la ecuación de difusión/advección empleando diferencias finitas. La digitalización de la geometría y el mapeo de la fuente de agua

proporciona un archivo de texto plano, donde cada pixel de la imagen tiene un valor de acuerdo con la frontera, la roca o el fluido. El código C++ inicializa todas las variables, crea las matrices que representan el espacio físico y carga la geometría en la variable *celda*. Esta variable tendrá la información sobre el tipo de medio almacenado en cada posición espacial de la matriz, determinando si es una roca (1) o un fluido (0) (figura 2).

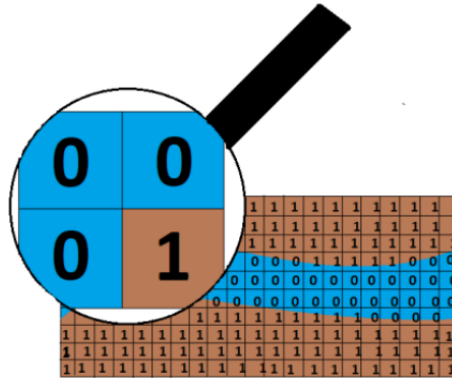


Figura 2. Etiquetado de las celdas para definir roca y fluido dentro del espacio de la simulación

Validación del método

La validación del método implica la comparación de las soluciones analíticas con las obtenidas por modelado numérico. Para validar el proceso de difusión, en ausencia de un campo de velocidad uniforme \vec{v} , la concentración $C(x, y)$ tiene un perfil gaussiano, dado por:

$$C(x, y, t = 0) = C_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (15)$$

Donde C_0 es el mayor valor en (x_0, y_0) y σ_0 es la desviación estándar, además la solución analítica es:

$$C(x, y, t) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + \sigma_D^2} C_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2(\sigma_0^2 + \sigma_D^2)}} \quad (16)$$

Con $\sigma_D^2 = 2 \cdot D \cdot t$, y D es el coeficiente de difusión. La tabla 1 contiene los parámetros usados, mientras que la figura 3 representa las soluciones analíticas y simuladas para cada uno de los procesos simulados.

La figura 3a muestra las soluciones analíticas y simuladas del fenómeno de difusión. La solución numérica es muy cercana a la analítica. El valor máximo de la concentración analítica es 0,1429 %, y el máximo está en el mismo punto arrojado por la solución simulada, 0,15 %. En la simulación del proceso advectivo se asume una velocidad de fluido homogénea. La solución analítica está dada por:

$$C(x, y, t) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + \sigma_D^2} C_0 e^{-\frac{(x-x_0-u_x t)^2+(y-y_0-u_y t)^2}{2(\sigma_0^2 + \sigma_D^2)}} \quad (17)$$

Tabla 1. Parámetros usados en la validación de la componente difusiva

Parámetros	Valor	Unidades
Dimensión x	200 Δx	Pixeles
Dimensión y	200 Δy	Pixeles
Localización del contaminante	(100,100) Δx	Lattice
σ_0	10 Δx	Lattice
Concentración	100	%
Tiempo de la simulación	200 Δt	Lattice
$\Delta x, \Delta y, \Delta t$	1	Lattice

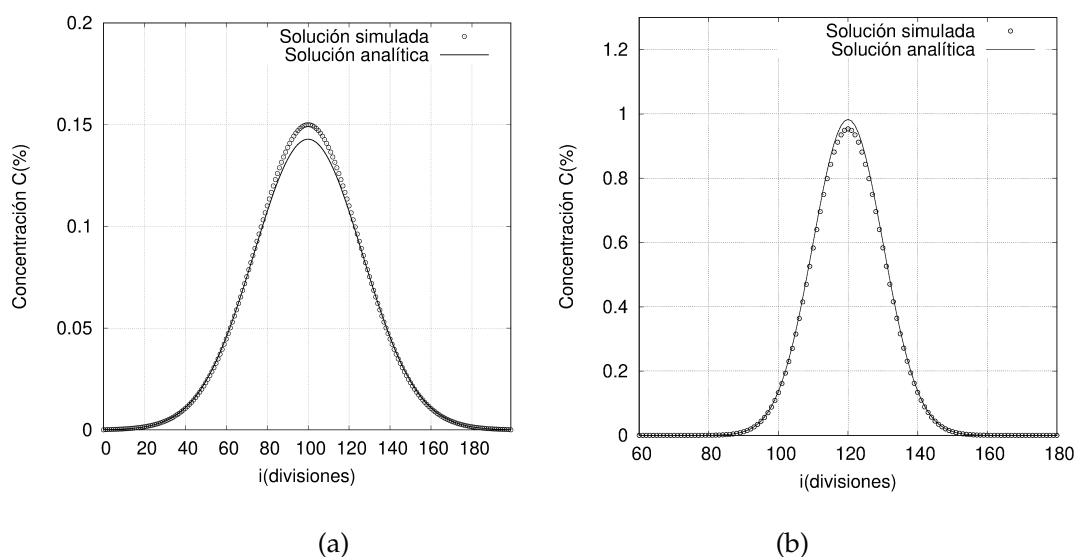


Figura 3. Distribución espacial de la concentración

- a)** Proceso difusivo, para un corte en $j = 100$, con un coeficiente de difusión $D = 1,5\Delta x^2\Delta t$ (unidades de Lattice) y velocidad $(0,0) \Delta x/\Delta t$ (unidades de lattice). **b)** Proceso advectivo, para un corte en $j = 120$, con un coeficiente de difusión $0,0043\Delta x^2/\Delta t$ (unidades de lattice) y velocidad $(v_x = 0, 1, v_y = 0, 1) \Delta x/\Delta t$ (unidades de lattice).

La figura 3b señala las soluciones analíticas y simuladas del fenómeno de advección después de pasos de $200\Delta t, t$ en unidades de la celda. La concentración analítica máxima es 0,98 % y el valor máximo para la simulación es 0,96 %, lo que indica la validez del enfoque de la solución.

RESULTADOS

En la figura 4 se ilustra la sección del río Sogamoso con su geometría utilizada en esta investigación. El área, ubicada en el departamento de Santander (Colombia), tiene coordenadas aproximadas entre $7^{\circ}15'19,4''N$ $73^{\circ}42'41,9''W$ y $7^{\circ}15'06,1''N$ $73^{\circ}43'19,8''W$ con una superficie estimada de 1,4 km (EW) a 0,9 km (NS).



Figura 4. Imagen satelital del tramo sobre el río Sogamoso

Fuente: [Google Maps](#). (s. f.).

La figura 5 muestra el mapa de color digitalizado, donde cada color determina un tipo de material, agua o roca y condiciones de borde. El azul (0) corresponde al río, el azul (1) a la roca y el amarillo a los cuerpos sólidos dentro del canal. En su estado inicial, el modelo asume un fluido con velocidad cero.

La condición en el borde izquierdo, el líquido entra, y la velocidad es de 1,3 m/s, mientras que el borde derecho por donde sale el líquido queda libre. El sistema evoluciona desde su estado inicial hasta alcanzar un estado estacionario; en adelante, se activa la fuente contaminante en el lado izquierdo dentro del río. La tabla 2 contiene los parámetros utilizados en la simulación.

La figura 6 señala el resultado de la simulación, con la velocidad del fluido en el tiempo $t=504$ s. A la entrada del río, a la izquierda, la velocidad es de aproximadamente 1,3 m/s, según un informe proporcionado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Las flechas amarillas indican la velocidad máxima de 1,3 m/s, las naranjas entre 0,6 m/s y 1,3 m/s. Los colores azul y gris son velocidades inferiores a 0,6 m/s. A la izquierda, el río viaja a 1,3 m/s y diverge en dos canales. En el canal superior, la velocidad disminuye a 1

m/s y luego 0,8 m/s hasta llegar a 0,6 m/s donde se divide en tres brazos. Posteriormente, los brazos se juntan y la velocidad aumenta entre 1,0 m/s y 1,3 m/s.

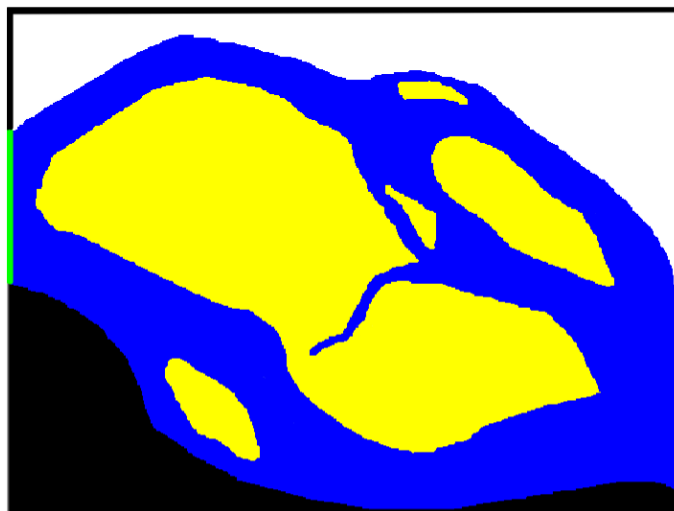


Figura 5. Mapa de color del tramo del río Sogamoso

Nota: el color azul toma la etiqueta de 0, este valor corresponde al río. El verde toma el valor de 1, el cual corresponde a la región de frontera donde entra el río. Rojo es 2, y corresponde a la región de frontera donde finaliza el río. Negro es 3 y blanco es 4, corresponden a la orilla superior e inferior del río, es decir la roca que delimita el río. Finalmente, con amarillo que corresponde al 5, es la roca o sedimentos en medio del río, simulan obstáculos para el paso del fluido.

Tabla 2. Parámetros del modelo

Parámetros	Valor	Unidades
Dimensión x	$250\Delta x$	Pixeles
Dimensión y	$190\Delta y$	Pixeles
Velocidad inicial en x	1,3	m/s
Velocidad inicial en y	0	m/s
Coefficiente de difusión	5	m^2/s
Densidad del fluido ρ	1000	kg/m^2
Tiempo de relajación r	$0,54\Delta t$	Lattice (adimensional)
Tiempo final	$2050\Delta t$	Lattice
$\Delta x, \Delta y, \Delta t$	1	Lattice

En la parte inferior del brazo, el río mantiene la velocidad a 1,3 m/s desde la entrada hasta donde diverge, donde cae a 1,0 m/s mientras que en el meandro inferior es 0,6 m/s. Desde el punto en el que los brazos se unen, la velocidad aumenta entre 1,0 m/s y 1,3 m/s. El número de Péclet está definido como $Péclet = \frac{v}{DL}$, donde v es la velocidad en m/s, L es la longitud característica y D es el coeficiente de difusión cuyo valor es de $5 \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor muestra la relación entre la parte advectiva y difusiva. El río Sogamoso presenta dos tramos, el superior e inferior. En el superior se encuentran valores del número de Péclet del orden de 16,6 a 0,09. Esto significa que, empezando el tramo, el número de Péclet es mayor (la parte advectiva predomina) y luego disminuye drásticamente por la disminución de la velocidad (en este punto predomina la parte difusiva). En el brazo inferior, el número de Péclet es menor al empezar el tramo ($Pe=36,4$) y al finalizar, en el sector donde se unen los dos tramos (superior e inferior), el número de Péclet toma el valor de 89.2.

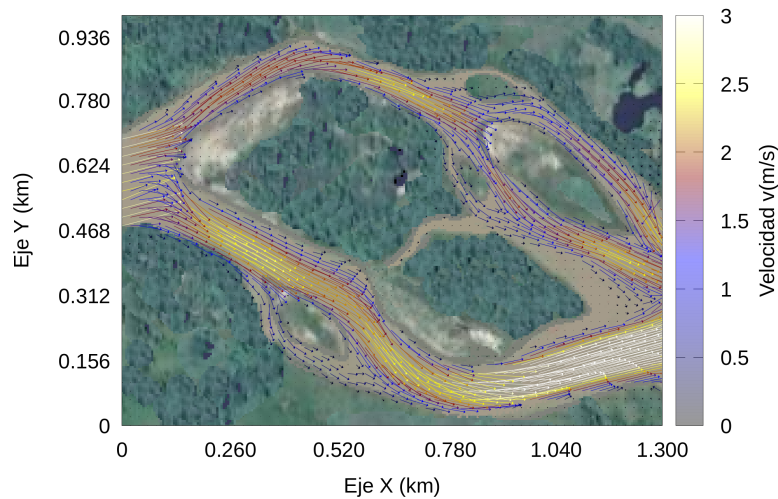


Figura 6. Campo vectorial de las velocidades en $t = 504 \text{ s}$

El río Sogamoso tiene aproximadamente 135 km de longitud, y una altitud que va desde 370 m en la fuente, hasta 70 m en su desembocadura en el río Magdalena. En la región de estudio, la elevación es de alrededor de 83 m ([Topographic-map.com \(s. f.\)](https://www.topographic-map.com)), y la pendiente de la topografía es de aproximadamente 0,00076 grados. La profundidad del río varía entre 2,5 m y 4,5 m ([Ideam, 2019](#)) de diciembre a abril, y puede aumentar hasta 7 m de mayo a junio ([Ideam, 2017](#)). El número de Froude proporcionado por la ecuación (18) representa la relación entre la inercia y la fuerza producida por la gravedad ([Seizilles et al., 2013](#), [Thual et al., 2015](#)).

$$Fr = \frac{F_{Inercial}}{F_{Gravidad}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_h}} \quad (18)$$

Donde v es la velocidad promedio del fluido, g es la gravedad y Dh es la profundidad hidráulica. En este punto del río Sogamoso, el número de Froude calculado de 0,22 señala un régimen subcrítico.

En el canal intermedio que intenta unir los dos brazos, parte central, el líquido permanece estancado. Un comportamiento similar ocurre en el área donde convergen los brazos. En una sección transversal del antebrazo, la velocidad cae de 1,3 m/s en la parte profunda, de 1,0; 0,8; 0,4; hasta estancarse en el banco de canales.

El comportamiento del fluido, mayor velocidad en áreas profundas y menor en bajíos y meandros, indica que el flujo es tipo Poiseuille a tan baja velocidad. Por otro lado, las direcciones de los vectores son consistentes con la geometría del río, colores más largos y cálidos (velocidades más altas) en los sectores más estrechos, y más cortos con colores más fríos (velocidades más bajas) cerca de la orilla. Según Krüger *et al.*, 2017, en la ecuación de Lattice-Boltzmann de isotérmica básica, C_s determina la relación $p = C_s^2 \rho$ entre la presión p con la densidad ρ , constante estimada a través de $C_s^2 = \frac{\Delta x^2}{3\Delta t} 3t^2$. Por tanto, $p = C_s^2 \rho$ permite estimar la distribución de presiones en el río.

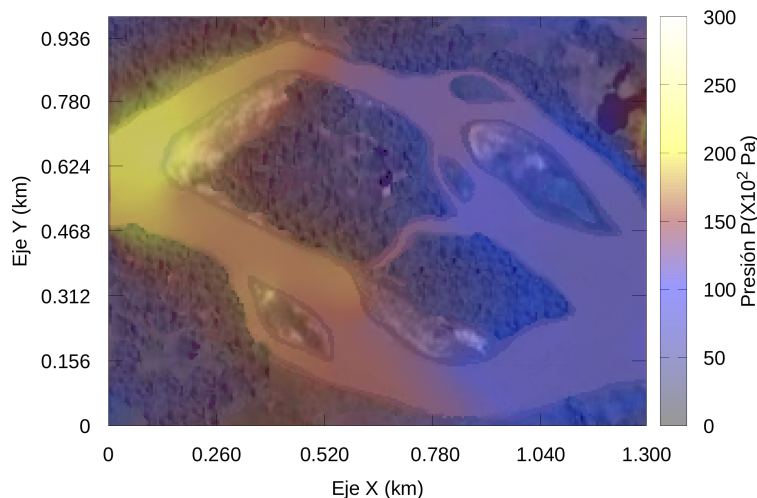
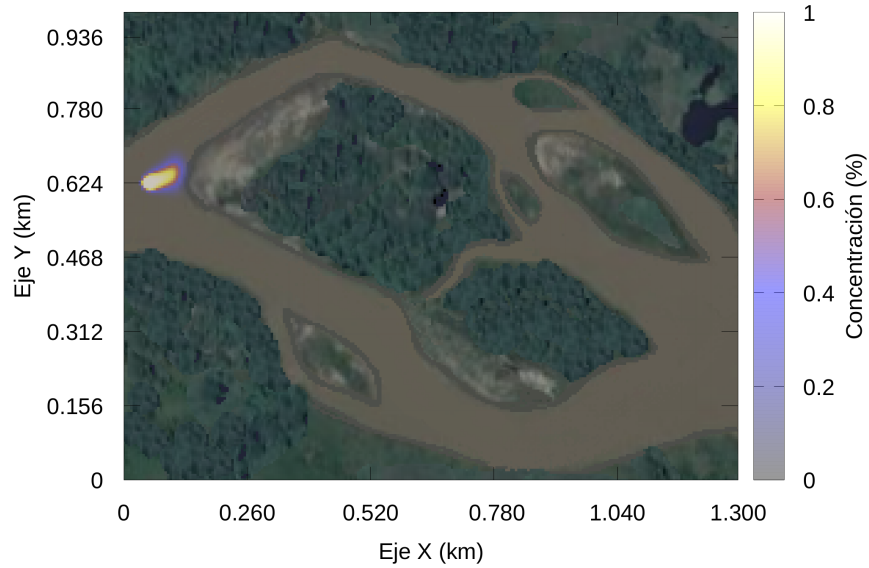
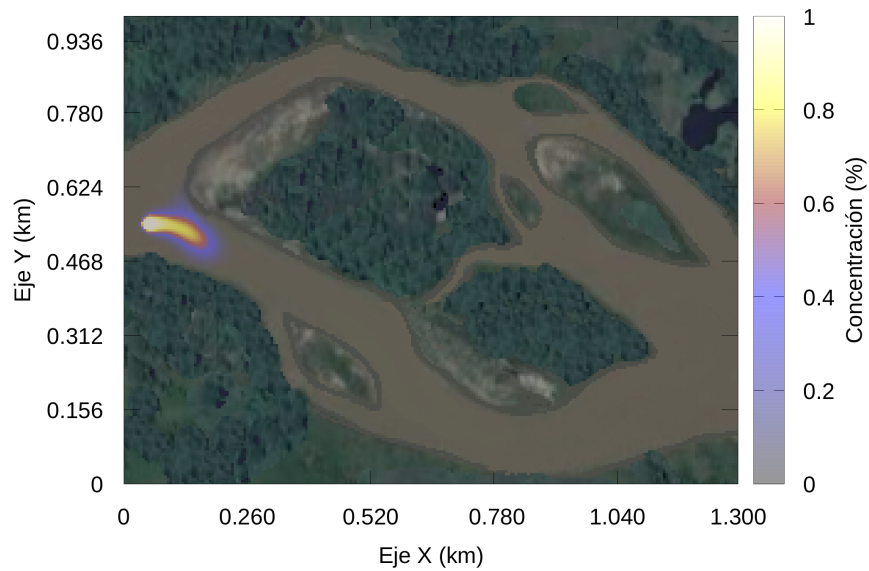


Figura 7. Campo escalar de la distribución de la presión en $t= 504$ s

La figura 7 ilustra la distribución de la presión en el río en el tiempo $t=504$ s. La presión máxima es de alrededor de 24 kPa (blanco), 21 kPa (amarillo); y los colores más fríos, como el azul (17 kPa) y los grises (14 kPa), representan las presiones más bajas. La presión es mayor en la zona de entrada del flujo y menor en la zona de salida. El empuje ejercido por la alta velocidad de entrada hace que la presión disminuya cuando el volumen de entrada se distribuye sobre un área más grande. Después de alcanzar un estado estable, la simulación del contaminante comienza cuando la fuente se activa. La primera fuente se ubica cerca de las coordenadas $x=0,087$



(a)

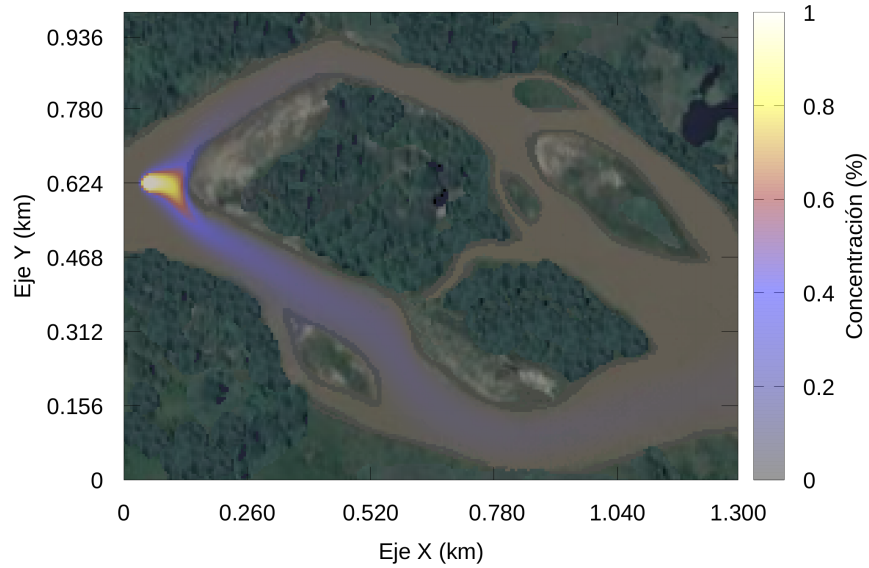


(b)

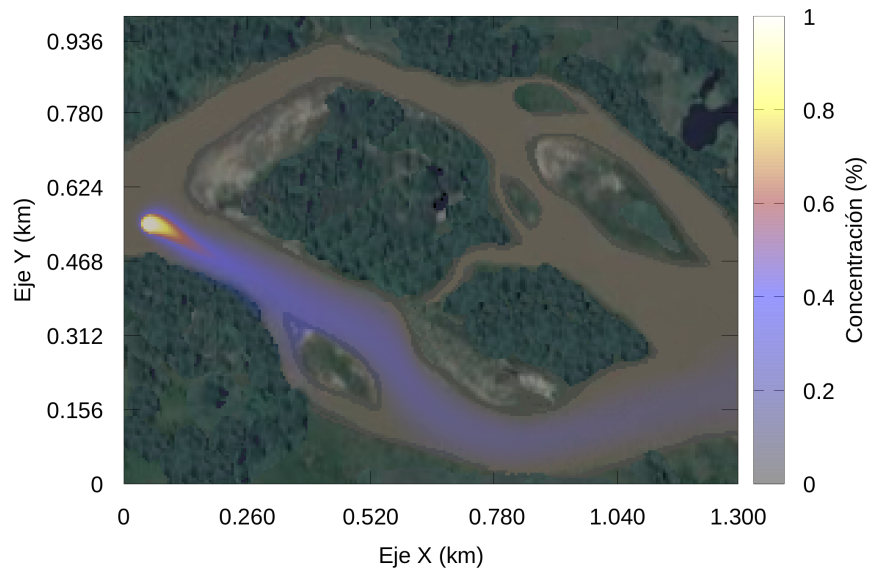
Figura 8. Distribución de la concentración

Nota: la escala de porcentaje está normalizada. **a)** $t=532$ s (28 s después de iniciada la contaminación).

b) $t = 1904$ s (1400 s después de iniciada la contaminación).



(a)



(b)

Figura 9. Distribución de la concentración

Nota: la escala de porcentaje está normalizada. **a)** $t = 532$ s (28 s después de iniciada la contaminación).

b) $t = 1904$ s (1400 s después de iniciada la contaminación).

km para la longitud y para la latitud $y=0,625$ km. La figura 8A muestra el instante $t=532$ s, 28 s después de comenzar la contaminación. Allí la concentración es alta y se esparce lentamente.

La figura 8b muestra el estado de simulación 1400 s después de comenzar la contaminación. La mancha avanza más rápidamente a lo largo el brazo superior que en el inferior, alcanzando una distancia aproximada de 1,1 km. Sin embargo, 1400 s después de que comenzara la contingencia, la concentración más alta pasa por el brazo inferior (1904 s) (figura 8b), debido a que ese canal tiene mayor velocidad y capacidad de transporte. En ese momento, la mancha se agranda, y alcanza una distancia de 1,3 km. En una segunda simulación, la fuente contaminante está más cerca de la boca del antebrazo en las coordenadas $x=0,087$ km para la longitud y para la latitud $y=0,546$ km.

Posteriormente, en la figura 9a se indica la propagación del contaminante por el brazo inferior, 28 s después de activar la fuente, mientras que un flujo más débil avanza lentamente por la parte superior del brazo. El leve desplazamiento de la fuente contaminante perturba el régimen de propagación, de tal manera que el contaminante solo transita por un canal, es decir, predomina la advección y por tanto el campo vectorial de velocidad. Es necesario aclarar que la fuente vierte contaminante a una concentración constante que corresponde al valor máximo.

CONCLUSIONES

Esta investigación informa un enfoque acoplado de los métodos "Lattice-Boltzmann diferencias finitas" para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y simular difusión/fenómenos de advección, con flexibilidad de ajuste a geometrías irregulares. Las soluciones analíticas conocidas de modelos clásicos en comparación con los generados por el método numérico destacan la alta confiabilidad y estabilidad del método. Las simulaciones señalaron que la advección predomina sobre la difusión.

Por otro lado, el método permite medir el nivel de contaminación a lo largo del río en el tiempo, además de la velocidad de propagación, para tomar acciones correctivas. El enfoque permite analizar el comportamiento de una catástrofe ambiental, como la voladura de una tubería en un cuerpo de agua, variando la intensidad y posición de la fuente, la velocidad del flujo, la morfología del río, el tamaño del área modelada y el tiempo de evolución. El enfoque es aplicable y útil en otros campos de la ciencia.

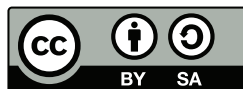
AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer especialmente al programa de Matemáticas de la Universidad El Bosque, y del programa de posgrado de Geofísica de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo brindado a esta investigación.

REFERENCIAS

- Bermúdez, B. y Juárez, L. (2014). Solución numérica de una ecuación del tipo advección-difusión. *Información Tecnológica*, 25(1), 151-160. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000100016>. ↑Ver página 80, 81
- Chen, S. y Doolen, G. D. (1998). Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 329-364. ↑Ver página 80, 81, 84
- Cortes Zambrano, M., Lara-Pérez, M. Y. y Acosta-Sabogal, I. D. (2022). Urban drainage water quality modeling on the SWMM software, northeastern sector, Santa Inés District, Tunja. *Tecnura*, 26(72), 167-184. <https://doi.org/10.14483/22487638.17575>. ↑Ver página 80
- Cuadros Segura, F. D., Moyano Salcedo, A. J., Pabón Laverde, A. M. y Trujillo Arias, J. V. (2021). Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos ilegales del municipio de Villavicencio, Colombia. *Tecnura*, 25(68), 43-62. <https://doi.org/10.14483/22487638.16273>. ↑Ver página 80
- García Sarmiento, J. (2019). *A Lattice Boltzmann model for the advection-diffusion equation in generalized coordinates* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76709>. ↑Ver página 80, 81
- Google Maps. (s. f.). [Tramo sobre el río Sogamoso]. Recuperado 24 de junio de 2021 de <https://www.google.com/maps/@7.2541784,-73.7147169,16z> ↑Ver página 87
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2017). *Informe hidrológico diario 154*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.cambioclimatico.gov.co/documents/78690/558885/6_IHD_Junio_2_Noche.pdf/2fed3450-6b8b-47e9-8685-83178a8269bd?version=1.0. ↑Ver página 89
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2019). *Informe hidrológico diario 096*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.cambioclimatico.gov.co/documents/78690/558885/4_IHD_Abril_06_Noche.pdf/9f80a6d7-b1c1-4837-9f57-2d392ab76f76?version=1.0. ↑Ver página 89
- Krüger, T., Kusumaatmaja, H., Kuzmin, A., Shardt, O., Silva, G. y Viggén, E. M. (2017). *The Lattice Boltzmann method*. Springer International Publishing. ↑Ver página 80, 83, 84, 90
- Liu, H., Ding, Y., Li, M., Lin, P., Yu, M. H. y Shu, A. P. (2015). A hybrid lattice Boltzmann method–Finite difference method model for sediment transport and riverbed deformation. *River Research and Applications*, 31(4), 447-456. <https://doi.org/10.1002/rra.2735>. ↑Ver página 80, 81

- Meng, W., Cheng, Y., Wu, J., Zhang, C. y Xia, L. (2020). A 1D-2D coupled Lattice Boltzmann model for shallow water flows in large scale river-lake systems. *Applied Sciences*, 10(1), 108. <https://doi.org/10.3390/app10010108>. ↑Ver página 80
- Moyano Salcedo, Á. J., Cuadros Segura, F. D., Pabón Laverde, A. M. y Trujillo Arias, J. V. (2021). Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos ilegales del municipio de Villavicencio, Colombia. *Tecnura*, 25(68), 43-62. <https://doi.org/10.14483/22487638.16273>. ↑Ver página 80
- Parmigiani, A., Latt, J., Begacem, M. B. y Chopard, B. (2013). A Lattice Boltzmann simulation of the Rhone river. *International Journal of Modern Physics C*, 24(12), 1340008. <https://doi.org/10.1142/S0129183113400081>. ↑Ver página 80, 81
- Romero Suárez, B. C. (2011). *Método de Lattice Boltzmann para difusión anómala en medios porosos* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10435>. ↑Ver página 80, 81
- Seizilles, G., Devauchelle, O., Lajeunesse, E. y Métivier, F. (2013). Width of laminar laboratory rivers. *Physical Review E*, 87(5), 052204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.052204>. ↑Ver página 89
- Thual, O., Lacaze, L., Mouzouri, M. y Boutkhamouine, B. (2015). Critical slope for laminar transcritical shallow-water flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 783. 10.1017/jfm.2015.559. ↑Ver página 89
- Topographic-map.com (s. f.). *Mapa topográfico río Sogamoso, altitud, relieve*. Recuperado el 24 de junio de 2021 de <https://es-co.topographic-map.com/maps/9ww7/Rio-Sogamoso/>. ↑Ver página 89
- Ureña, F., Benito, J. J. y Gavete, L. (septiembre de 2009). Resolución de la ecuación de advección-difusión en 2-D utilizando diferencias finitas generalizadas. Consistencia y estabilidad. En *XXI Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones. XI Congreso de Matemática Aplicada* (pp. 1-8). Universidad de Sevilla. ↑Ver página 80, 81
- Vázquez, J. L. (2004). La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matemático para el siglo XXI. *Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 26, 31-56. ↑Ver página 82



Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas

Learning programming computer using STEAMRW in Systems Engineering

Omar Iván Trejos Buriticá ¹, Luis Eduardo Muñoz Guerrero ²

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2020

Fecha de Aceptación: 20 de noviembre de 2022

Cómo citar: Trejos-Buriticá, O. I., Muñoz-Guerrero, L. E. (2023). Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas. *Tecnura*, 27(76), 95-110. <https://doi.org/10.14483/22487638.15985>

Resumen

Objetivo: El propósito de la investigación consiste en comparar, a partir de los datos tanto cuantitativos como cualitativos, el aporte de la estrategia STEAMRW al proceso de aprendizaje de la programación de computadores.

Metodología: En el presente artículo se exponen los resultados obtenidos en dos cursos paralelos de programación a lo largo de tres años. En uno de ellos se adoptó la metodología STEAM con lectoescritura (RW) activa y constante, y en el otro se impartió el curso a partir de la metodología tradicional de enseñanza universitaria.

Resultados: Según los hallazgos, la metodología STEAMRW le provee al estudiante una serie de competencias allende el simple conocimiento temático y que son determinantes para el desarrollo de su perfil profesional en el siglo XXI.

Conclusiones: Se concluye que es muy conveniente que se capacite a los docentes ingenieros de programas de Ingeniería para que comprendan la dimensión de esta metodología, y las ventajas a las cuales pueden acceder desde la perspectiva del aprendizaje por parte de sus alumnos.

Financiación: Proyecto de investigación sin financiación.

Palabras clave: aprendizaje, ingeniería, paradigma, programación, STEAMRW.

Abstract

Objective: The purpose of the research was to compare, from both quantitative and qualitative data, the use of STEAMRW in the learning computer programming process in Systems Engineering.

¹Ingeniero de Sistemas, Especialista en Instrumentación Física, M. Sc. en Comunicación Educativa, Ph. D. en Ciencias de la Educación. Docente titular de planta, investigador sénior de Colciencias. Facultad de Ingenierías, Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira (Colombia). Email: omartrejos@utp.edu.co

²Ingeniero de Sistemas, M. Sc. en Ingeniería de Sistemas, Ph. D. en Ciencias de la Educación. Docente de planta, investigador júnior de Colciencias. Facultad de Ingenierías, Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira (Colombia). Email: lemunozg@utp.edu.co

Methodology: This article shows the results of a research made in an Engineering program in two parallel computer programming courses over three years. In one of them the STEAM methodology was adopted complementing with active and constant Reading / Writing (RW) strategy and in the other course, this was taught based on the traditional methodology of university teaching.

Results: The findings demonstrate that the STEAMRW methodology provides the student with a series of competencies that go beyond simple thematic knowledge and are decisive for improve their professional skills in the 21st century.

Conclusions: It is concluded that it is very convenient for teachers of engineering programs to be trained in it so that they understand the dimension of this methodology and the advantages they can access from the perspective of learning by their students.

Financing: This is a Project without financing.

Keywords: Engineering, learning, paradigm, programming, STEAMRW.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	97
Marco teórico	99
Metodología	102
Resultados	103
Discusión	103
Conclusiones	108
Referencias	108

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de los programas de Ingeniería en Colombia radica en la ausencia de alta capacitación de los docentes ingenieros en teorías, modelos, estrategias y actividades que, heredadas de las ciencias de la educación (Acosta Flores, 2003), posibiliten un aprendizaje mejor, más efectivo y en el cual se cristalicen por un camino más expedito todos los esfuerzos que, al respecto, hagan los docentes (Padilla Escorcía, 2022). Una de las metodologías que han sido exitosas se conoce como STEAM, que corresponde al acrónimo de *science, technology, engineering, arts and maths*, y que se complementa con una lectura/escritura (*reading and writing*, RW) activa y permanente.

El objetivo de la presente investigación consiste en establecer un comparativo entre el aporte que le provee al estudiante de Ingeniería de Sistemas la metodología STEAMRW, en relación con la de enseñanza tradicional, mayoritariamente adoptada por los docentes ingenieros. Este comparativo se realizó a la luz de dos enfoques investigativos: el cuantitativo (a través de talleres calificables, evaluaciones, exámenes breves, y parciales) y el cualitativo (a través de la observación, diálogo con los estudiantes y análisis de avances a partir de dudas que los mismos alumnos exponen).

La novedad de este artículo se podría resumir en tres ítems: a) el hecho de que este proceso sea liderado por un ingeniero con Doctorado en Ciencias de la Educación, perfil que cada vez más se va convirtiendo en una necesidad para los programas de Ingeniería; b) la investigación educativa en el aula en programas de Ingeniería, hecho que es poco usual debido al fortalecimiento del perfil técnico y tecnológico de los docentes ingenieros y a la poca atención que se le presta al perfil docente y pedagógico de ellos mismos, y c) la adopción de una metodología de gran modernidad que posibilita el desarrollo de habilidades y competencias que en el siglo XXI son muy necesarias y en la resolución de los nuevos problemas y los nuevos escenarios que van apareciendo a partir de los acelerados cambios del mundo actual.

La investigación se justificó debido a que cada vez son más los programas de Ingeniería de Sistemas que forman parte de la oferta profesional universitaria en Colombia, lo cual se refleja en el incremento de la preferencia de este programa, según el informe 2018 del Ministerio de Educación Nacional (MEn, 2016). A esto se suma la necesidad del mundo moderno de capacitar a los docentes ingenieros en teorías, modelos, metodologías y estrategias que faciliten el aprendizaje, y que estén en sintonía con el incremento del conocimiento alrededor de un campo tan amplio (y cada vez más amplio) como el de la ingeniería.

Desde la formulación de la teoría del aprendizaje significativo por David Paul Ausubel (Ausubel, 2012), pasando por el aprendizaje por descubrimiento (Bruner, 2009) hasta llegar a la metodología STEAMRW (Watson y Watson, 2013), son muestras de la gran preocupación del ser humano, de la investigación científica y del aporte de las ciencias de la educación en la búsqueda de caminos más sencillos y expeditos para que se logren mejores resultados en procesos de aprendizaje (Trejos y Muñoz, 2022), y que a su vez minimicen o mantengan los esfuerzos que, al respecto, realicen los docentes en diferentes áreas.

Este artículo es un producto del proyecto de investigación código 6-16-13 avalado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Toda la información y los datos recogidos fueron obtenidos en el aula como trabajo de campo en los cursos Programación I y Programación II, de Ingeniería de Sistemas y Computación, de la UTP. La investigación se llevó a cabo durante los semestres I y II de los años 2017, 2018 y 2019. En su estructura, el artículo se ajusta al formato IMRYD que incluye una introducción (con un marco teórico), la metodología y los resultados obtenidos, de donde se derivan una discusión y sus respectivas conclusiones.

MARCO TEÓRICO

Las estrategias metodológicas para enseñar y aprender que se adoptan en cualquier ciclo de formación tienen, normalmente, un fundamento teórico que les subyace y que les permite contar con elementos de juicio para evaluar los logros y los alcances del proceso en sí (De Zubiría, 2007). Aprender implica un cambio importante en la base cognitiva del cerebro a partir del cual se reemplazan, o se fortalecen, unos conocimientos con otros (Llanos Mosquera, 2021). Esto hace que la formación profesional en cualquier carrera universitaria deba contar con una capacitación de los docentes, de manera que capitalicen, de la mejor de las formas, las teorías, modelos, estrategias y actividades que hacen realidad dichas teorías en el aula (Bruner, 2006).

La formación en ingeniería no es la excepción y, por tanto, es de esperarse que los docentes ingenieros (que normalmente están más ocupados con el conocimiento disciplinar que con el conocimiento pedagógico) también conozcan estas teorías y sus modelos asociados, para que los esfuerzos que emprenden desde sus propias experiencias docentes sean efectivos, en función del aprendizaje de los alumnos, es decir, que estos aprendan más en menor tiempo, con mayor efectividad y con una recordación a largo plazo (Annanth, 2016, Ladino Moreno *et al.*, 2021).

La teoría del aprendizaje significativo privilegia el significado del conocimiento y concibe este como el conjunto de saberes que se derivan y se relacionan con aquello que el estudiante ya sabe (Ausubel, 2010). Por esta razón se parte de que es mucho más sencillo aprender aquel conocimiento que tiene significado para el estudiante que aquel que no lo tiene, y por tal motivo establece que el aprendizaje se fundamenta en el conocimiento previo (todos aquellos saberes académicos y vivenciales que el estudiante ya trae previos al proceso de aprendizaje), el nuevo conocimiento (todos aquellos saberes que para el estudiante son nuevos y los que, en general, no necesariamente lo son) y la actitud del estudiante (que incluye motivación y capacidad de relacionar conocimientos previos con nuevos conocimientos). Es de anotar que en el factor motivacional cuenta, posiblemente más que en cualquier otro componente, el trabajo que al respecto realice el docente.

Por su parte, la teoría del aprendizaje por descubrimiento establece que el ser humano aprende mejor todo aquello que este descubre, con sus propios conocimientos y acudiendo a sus propias conclusiones (Basogain Olabe *et al.*, 2015). En el aprendizaje por descubrimiento cobran gran importancia la contextualización, la apropiación y la evaluación del conocimiento como parte del proceso de asimilación. A la luz de esta teoría, se plantea la necesidad de que el docente se ocupe de definir un conjunto de premios y castigos que sea coherente que le permitan al estudiante ver retos alcanzables y castigos justos.

Estas dos teorías, y sus teorías derivadas, han facilitado la concepción de la metodología STEAMRW. Esta propone que el conocimiento no solo se base en el saber disciplinar, sino que

también se consideren aquellas otras componentes del saber que le permitirán al futuro profesional (hoy, estudiante) articularse apropiadamente con la sociedad contemporánea dentro del marco de los nacientes escenarios y de las nuevas necesidades (Yakman y Lee, 2012).

La concepción de STEAM proviene del acrónimo de *science, technology, engineering, arts and maths* y propone que un estudiante universitario debiera poder relacionar el conocimiento disciplinar con cada una de estas áreas, de forma que sepa qué sabe, sepa cómo se relaciona con otras ciencias, sepa la génesis y aplicación del conocimiento y pueda tener un panorama claro de la perspectiva de dicho conocimiento de cara al futuro.

El acrónimo, en detalle, implica tener en cuenta que:

- *Science*: proviene de *ciencia* e involucra el conocimiento de los cambios, a lo largo del tiempo, de aquellos modelos matemáticos que han soportado, en este caso específico, la programación de computadores, lo cual incluye el desarrollo tanto del *hardware* como del *software*, los entornos de desarrollo y los lenguajes de programación, desde una perspectiva histórica aplicada, es decir, teniendo en cuenta cómo han ido cambiando las necesidades y, con ellas, la concepción del ser humano en pos de resolverlas.
- *Technology*: su traducción al español es *tecnología* e implica el conocimiento detallado del estado del arte y las condiciones modernas que subyacen a un lenguaje de programación, tanto en sus posibilidades tecnológicas como en sus fundamentos conceptuales y en sus aplicaciones. Así mismo deberá tener en cuenta los recursos con los cuales cuenta un determinado lenguaje de programación, el paradigma de programación que lo sustenta y las utilidades que han sido desarrolladas para facilitar el trabajo de los programadores.
- *Engineering*: significa *ingeniería* e involucra la aplicación plena del conocimiento tecnológico dentro del contexto de la resolución de las necesidades del mundo moderno, teniendo en cuenta los nuevos escenarios, formas de interacción y problemas que surgen por el avance y penetración de la tecnología en la sociedad de hoy. También implica la apropiación y aplicación, mínimamente, de una metodología que posibilite la solución de un problema computable (aquellos que pueden resolverse con la participación de un computador), así como la relación y posibilidades de la metodología con el problema como tal, su impacto social, económico, político y cultural.
- *Arts*: que se traduce como *artes* implica una concepción estética desde la perspectiva de la evolución de la tecnología y la ingeniería, su relación con el mundo, las implicaciones que ha tenido con dicho mundo y las transformaciones que ha generado tanto en el entorno como en la concepción cultural del ser humano. De la misma manera, *arts* supone una relación con las nuevas formas de expresión artística moderna y, con ello, una visualización de los posibles cambios estéticos de la sociedad que podrían derivarse del uso de los recursos tecnológicos en la vida normal.

- *Maths*: involucra a las *matemáticas* y esto invita a que el estudiante conozca, con buen nivel de detalle, tanto el modelo matemático (o paradigma de programación) que subyace al lenguaje de programación, los modelos que han existido a lo largo del tiempo y la proyección de dichos modelos en función de posibles escenarios nuevos que aparezcan en el futuro y para los cuales la tecnología ha de estar completamente adecuada. Las matemáticas involucran aplicación, utilidad y ciencia como herencia de las ciencias básicas en la concepción del estudiante de ingeniería moderna desde los primeros semestres hasta los últimos de su proceso de formación.

Toda esta metodología se fortalece con procesos de lectura y escritura, intensos y constantes. De allí el porqué el colofón del acrónimo es RW (*reading and writing*) que implica habituar al estudiante de ingeniería a leer y escribir. Leer implica hacerlo a la luz de las nuevas formas que han surgido con los nuevos recursos tecnológicos. También, supone adquirir una disciplina que permita no solo acceder a la información que llega por diferentes medios visuales, auditivos o multimediales, sino que esta se pueda aplicar y relacionar con los conocimientos disciplinares, teniendo en cuenta que no solo son estos el motivo para leer, sino que el ingeniero moderno también debe leer, en su proceso de formación, desde los clásicos hasta los escritores contemporáneos; desde el saber tradicional que ha evolucionado con la sociedad hasta los nuevos saberes en diferentes áreas.

Escribir, que correspondería a la contraparte, es una competencia de alta importancia en tiempos modernos, puesto que lo que queda en cualquier área de conocimiento no es lo que se sabe, sino lo que queda escrito, y despertar la pluma de los estudiantes de ingeniería es el camino más directo para que sus aportes perduren, a la luz del estilo de redacción científica, y para que el conocimiento crezca a partir de su propia retroalimentación.

En cuanto a las bases epistemológicas de la metodología STEAMRW se exponen a continuación algunas de ellas:

- *Science*: aproximarse al conocimiento de los aportes y la evolución de la ciencia posibilita una comprensión más real de sus posibilidades en la sociedad de cara al corto, mediano y largo plazo (Cao, 2018).
- *Technology*: aplicar, usar y retroalimentar la tecnología constituye una competencia de gran importancia en el mundo moderno, dada la alta penetración de dispositivos y servicios tecnológicos e informáticos (Johnson y Wetmore, 2008).
- *Engineering*: interactuar con los conocimientos disciplinares de una ingeniería que constituyen ese corpus que la justifica corresponde a uno de los grandes objetivos a alcanzar dentro del proceso de aprendizaje y formación de ingenieros (Bugliarello, 2002).
- *Arts*: aproximarse al arte favorece una aproximación a la evolución del ser humano, sus diferentes formas de pensar, de concebir su entorno, de interactuar y cambiar sus realida-

des y sus contextos, de conocer un poco sus fantasías y sus creaciones y de poder analizar los cambios que en el futuro podrían presentarse en la sociedad ([Araya Alemparte, 2017](#)).

- *Maths*: el camino más expedito para capitalizar y aprovechar las posibilidades que ofrece un modelo matemático sistematizado a través de un paradigma de programación es el conocimiento de los elementos de juicio matemáticos que subyacen a sus conceptos, teorías y aplicaciones ([Boyer, 2010](#)).
- *Reading and writing*: dos competencias necesarias en el mundo moderno, tanto para que el profesional siglo XXI conozca y apropie la evolución del conocimiento, como para que sus aportes a dicho conocimiento puedan dejar una huella de retroalimentación de cara al futuro ([Estrada Esponda, 2017](#), [Lindsay, 2011](#)).

METODOLOGÍA

Para desarrollar esta investigación se procedió de la siguiente forma:

- Se seleccionó un periodo de tiempo de tres años (equivalente a seis semestres) para realizar la investigación de campo en el aula. Estos tres años involucraron 2017, 2018 y 2019 en sus respectivos semestres I y II.
- Por cada semestre se escogieron dos grupos de programación. Se seleccionaron dos cursos de la asignatura Programación I, y en el II semestre dos cursos de Programación II. La selección de los cursos se realizó sobre los que le fueron asignados al docente autor de la presente investigación.
- Se realizó un diseño curricular de la asignatura Programación I y Programación II de manera que se mantuviera temáticamente dentro de los linderos conceptuales establecidos por el comité curricular de Ingeniería de Sistemas y Computación y, al mismo tiempo, se mantuvo el contenido original del curso. El contenido alternativo se construyó teniendo en cuenta el marco conceptual de la estrategia STEAMRW.
- Con uno de los cursos se aplicó el contenido original y la metodología tradicional de enseñanza y aprendizaje de la programación, tanto en Programación I como en Programación II, y con el otro se adoptó el que se rediseñó, tomando como base STEAMRW.
- En ambos cursos se programaron evaluaciones parciales cada cuatro semanas que se realizaron en las semanas 4.^a, 8.^a y 12.^a para tres evaluaciones parciales durante el semestre, cada una con peso porcentual del 20 % sobre la nota definitiva.

- Las evaluaciones parciales, en ambos grupos paralelos, se realizaron a la misma hora y bajo las mismas condiciones. El contenido de dichas evaluaciones parciales fue el mismo para ambos grupos, con el ánimo de realizar los análisis comparativos pertinentes.
- La estrategia STEAMRW formó parte de los elementos adicionales con los cuales se pretendió fortalecer el trabajo académico en el curso en el cual no se adoptó frontalmente STEAMRW. De esta forma, se procuraba el espacio para que los alumnos llegaran en las mismas condiciones de conocimiento a cada una de las evaluaciones parciales.
- El examen final tuvo un peso del 30% sobre el total de la nota definitiva y también se realizó en ambos cursos en las mismas condiciones y con el mismo contenido.
- El restante 10% que faltaba para completar el 100% de la nota definitiva se asumió como una nota apreciativa con un valor cuantitativo de 5,0, como factor motivacional para los estudiantes.
- La tabla 1 presenta, a grandes rasgos, la comparación entre el contenido de la asignatura Programación I en su estado original, es decir, tal como lo formalizó el comité curricular, y el contenido de la misma asignatura bajo los lineamientos de la estrategia STEAMRW. De esta forma se realizó un trabajo equivalente con la asignatura Programación II.

Como se puede observar, el contenido oficial de la asignatura Programación I está inmerso en la propuesta de contenido STEAMRW, ampliando y fortaleciendo los conceptos que se consideren pertinentes.

RESULTADOS

En la tabla 2 se expone la cantidad de estudiantes que participaron en la investigación.

Se ha calculado el promedio cuantitativo de los cursos de forma que se haga más sencillo tanto el tratamiento como las inferencias que se deriven. La tabla 3 detalla el comparativo de las pruebas parciales.

La tabla 4 muestra los datos de la evaluación final en cada semestre.

DISCUSIÓN

Alrededor de la adopción de la estrategia STEAMRW existen varias razones que favorecen el aprendizaje de la programación. Algunas reflexiones al respecto, abiertas a la discusión, se exponen a continuación. El estudio de la ciencia (*science*) permite al estudiante conocer la forma como el conocimiento científico ha estado a disposición del ser humano, y propende a ser el fundamento para la solución de muchos de los problemas de la sociedad moderna. Por su

Tabla 1. Comparativo contenido Programación I

Semanas	Contenido oficial	Contenido STEAMRW
1 ^a – 4 ^a	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción a la Programación. • Programación funcional. • El concepto de función. • Funciones de interfaz. • Funciones de Cálculo. • Un programa funcional. 	<p>S – El desarrollo histórico del hardware. T – El IDE de Racket. E – Funciones, Tipos y Programación Funcional. A – Funciones de Interfaz. M – Principios de Cálculo Lambda. R – “La magia de lo simple”. W – Resumen de lo visto.</p>
5 ^a – 8 ^a	<ul style="list-style-type: none"> • Notación Prefija. • Operadores Matemáticos. • Operadores Relacionales. • Operadores Lógicos. • Condicionales. • Validación de Datos. 	<p>S – Características de un computador. T – Evaluación de Expresiones. E – Notación Prefija, Operadores y Condicionales. A – La decisión como expresión de arte. M – Condicionales y Cálculo Lambda. R – Entornos Digitales y Arte Contemporáneo. W – Resumen de lo visto.</p>
9 ^a – 12 ^a	<ul style="list-style-type: none"> • Funciones Recursivas. • Recursividad 1.er nivel. • Recursividad 2.º nivel. • Recursividad 3.er nivel. • Ciclos e Iteraciones. • Cálculos Repetitivos. 	<p>S – El hardware redundante. T – Los procesos iterativos. E – Recursividad y Funciones Recursivas. A – Escher. M – Expresiones Matemáticas Recursivas. R – Mobius, Escher, Pascal y Napier. W – Resumen de lo visto.</p>
13 ^a – 16 ^a	<ul style="list-style-type: none"> • Conjuntos de Datos. • Listas. • Vectores. • GUI. • Programas Completos. • Utilidades. • Aplicaciones. 	<p>S – Hardware y Dispositivos. T – Conjuntos de Datos. E – Listas y Vectores. A – GUI. M – Human Computer Interface. R – Diseño e Interacción Comput. – Hombre. W – Resumen de lo visto.</p>

parte, la tecnología (*technology*) le aporta al estudiante el conocimiento de los fundamentos de programación desde la perspectiva de la ciencia.

Tabla 2. Estudiantes involucrados

Año	Semestre	Asignatura	Estudiantes con contenido oficial	Estudiantes con contenido STEAMRW	Total
2017	I	Programación I	19	23	42
	II	Programación II	20	21	41
2018	I	Programación I	22	23	45
	II	Programación II	21	21	42
2019	I	Programación I	22	20	42
	II	Programación II	23	22	45
Total			127	130	257

Tabla 3. Resultados comparativos. Evaluaciones parciales

Año	Semestre	Evaluación parcial	Curso con contenido oficial	Curso con contenido STEAMRW	Diferencia
2017	I	1.º	3,5	4,4	0,9
		2.º	3,8	4,3	0,5
		3.º	3,3	4,6	1,3
	II	1.º	3,4	4,3	0,9
		2.º	3,5	4,5	1,0
		3.º	3,5	4,4	0,9
2018	I	1.º	3,2	4,8	1,6
		2.º	3,6	4,7	1,1
		3.º	3,3	4,6	1,3
	II	1.º	3,4	4,6	1,2
		2.º	3,3	4,5	1,2
		3.º	3,1	4,6	1,5
2019	I	1.º	3,5	4,5	1,0
		2.º	3,5	4,3	0,8
		3.º	3,4	4,4	1,0
	II	1.º	3,6	4,7	0,9
		2.º	3,7	4,8	0,9
		3.º	3,6	4,6	1,0
Promedios			3,5	4,5	1,1

Tabla 4. Resultados cuantitativos. Evaluación final

Año	Semestre	Curso con contenido oficial	Curso con contenido STEAMRW	Diferencia
2017	I	3,6	4,3	0,7
	II	3,2	4,5	1,3
2018	I	3,5	4,6	1,1
	II	3,3	4,4	1,1
2019	I	3,2	4,8	1,6
	II	3,4	4,7	1,3
Promedios		3,4	4,6	1,2

Estudiar la Ingeniería (*engineering*) de Sistemas, que es el caso que aquí concierne, es la esencia misma del proceso de formación que implica la oferta de este programa académico, y podría decirse que es la espina dorsal del conocimiento disciplinar que justifica los esfuerzos pedagógicos, temáticos y académicos en pro de la apropiación del saber ingenieril. El estudio de las artes (*arts*) permite que el estudiante, desde una etapa infante, tenga una aproximación tanto a la evolución del pensamiento estético del ser humano, elemento de juicio que tiene una relación directa con la penetración de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en la sociedad moderna, como también a los elementos que han permitido que dicha evolución se cause; es decir, a las razones por las cuales se ha ido cambiando la percepción del entorno dentro del marco de los conceptos que provee el arte.

Las matemáticas (*maths*) posibilitan el conocimiento de los fundamentos, representación y modelación de las realidades desde la perspectiva que brinda esta área de las ciencias básicas. El saber que proveen las matemáticas y su aplicación dentro de un contexto de aprendizaje tecnológico permite que el estudiante extrapole dichos conocimientos para proyectar, de cara al futuro, los fundamentos científicos que soportan la solución de problemas de la sociedad. La lectura (*reading*) y escritura (*writing*) constante y activa le permiten al alumnado acceder a información escrita y, con ello, construir la argumentación que le permitirá expresar sus ideas, al tiempo que con STEAM podrá adquirir un conjunto de conocimientos que posibilitarán un discurso coherente, académico y científico, además de todo un entorno que posibilita aprovechar al máximo las facilidades que los avances de la tecnología pone a disposición del ser humano, en tiempos en que aparecen nuevos problemas dentro del contexto de nuevos escenarios. Es de anotar que conviene mucho, en términos de aprendizaje y argumentación, fomentar en los estudiantes la lectura de textos literarios, no solamente libros científicos o técnicos. Además, es muy importante que el alumnado de ingeniería se habitúe a leer información diversa que tiene que ver con el mundo moderno: economía, política, conflictos sociales, realidad mundial, etc.

En la tabla 1 (y que ha sido presentada grandes rasgos ya que tanto la propuesta formal como la STEAMRW está escrita sesión por sesión), se puede notar que el contenido es un poco más voluminoso y es allí donde el docente tendrá que hacer uso de su creatividad para que el estudiante avance a lo largo de las dieciséis semanas que conforman el semestre académico, accediendo a conocimiento, saberes e información dentro de un espectro amplio que provee la estrategia adoptada.

Según se muestran los datos en la tabla 2, el número de estudiantes se estimó sobre la base de que el promedio de grupos en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira es de veinte alumnos y normalmente se cuenta con cinco grupos de Programación I (y cinco de Programación II), lo cual define que, por semestre, la muestra fue del 20 % de alumnos en una población posible promedio de cien estudiantes.

Al analizar la información comparativa de las evaluaciones parciales en cada curso paralelo, semestre a semestre discriminado por evaluación parcial, se puede observar que, en todo momento, el promedio de las valoraciones cuantitativas fue superior en los grupos donde se adoptó STEAMRW, que aquellos en los que solo se adoptó el contenido oficial sin ninguna adenda que lo fortaleciera. La diferencia mínima entre dichos promedios fue de 0,5 y la diferencia máxima fue de 1,6 que es una diferencia significativamente alta, si se tiene en cuenta que la escala de valoración es de 1 a 5; por consiguiente, tal diferencia frisa linderos superiores al 30 % del valor máximo posible.

De otra parte, vale la pena notar cierto incremento en la nota de las evaluaciones parciales pues, con el tiempo, los estudiantes de ambos cursos paralelos van apropiándose mucho más de la metodología. Los que recibieron el curso con el contenido oficial sin ninguna adenda que lo fortaleciera, encontraron sentido a los documentos que se les enviaba para fortalecer su conocimiento. Los otros estudiantes, los de los grupos STEAMRW, procedieron en consecuencia con la estrategia y adoptaron lo propio para que los resultados fueran tan favorables como los que se presentan, de forma promediada, en la tabla 3. Es de considerar que en ambos cursos se proveyeron los mismos documentos para que los estudiantes estuvieran preparados, dado que tanto las evaluaciones parciales como la evaluación final fueron las mismas para ambos grupos paralelos.

La evaluación final (tabla 4) tiene una tendencia similar a la información de la tabla 3. En todo momento, los resultados de los grupos con contenido STEAMRW fueron significativamente más favorables que los resultados de los que solo tuvieron el contenido oficial. La diferencia máxima también llegó a ser de 1,6 y competen en este ítem las mismas reflexiones a que hubo lugar en el caso similar en las evaluaciones parciales.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el objetivo de esta investigación era establecer un comparativo entre el aporte que le provee al estudiante de Ingeniería de Sistemas la estrategia STEAMRW, frente a la metodología tradicional de enseñanza aprendizaje en un curso de Programación I y Programación II (los dos primeros cursos de programación en esta carrera), puede inferirse que tanto en lo cuantitativo como en lo cualitativo es mucho más favorable la formación de ingenieros a partir de contenidos planeados y desarrollados bajo la estrategia STEAMRW que bajo los convencionales, que no incluyen ninguna adenda metodológica que lo potencialice.

Vale la pena tener en cuenta que la estrategia STEAMRW posibilita a un estudiante de ingeniería de sistemas a) un manejo amplio de un discurso coherente con la formación que recibe; b) un conocimiento del estado y prospectiva de las tecnologías modernas (especialmente lo que se refiere al mundo computacional); c) una relación práctica entre el conocimiento disciplinar de la ingeniería y el mundo moderno que involucra nuevos problemas y nuevos escenarios; d) una aproximación a la evolución del pensamiento estético de la sociedad y a la participación de las TIC en dicha evolución desde la perspectiva contemporánea; e) una apropiación de los teorías y modelos matemáticos que subyacen a la expresión tecnológica que se refleja en un lenguaje de programación, y f) una relación directa tanto con las fuentes de consulta (desde la lectura) como con la expresión escrita y la argumentación (desde la escritura).

REFERENCIAS

- Acosta Flores, J. (2003). *Ingeniería de Sistemas, un enfoque interdisciplinario*. Alfaomega Grupo Editorial. ↑Ver página 97
- Annanth, M. (23 de marzo de 2016). The importance of humanities in Engineering Education. *The Fifth Estate*. <https://www.t5eitm.org/importance-humanities-engineering-education/> ↑Ver página 99
- Araya Alemparte, D. (15 de junio de 2017). La educación como desarrollo personal: propuesta de innovación educativa. *Revista Educación y Ciudad*, 32, 43-51. ↑Ver página 102
- Ausubel, D. (2010). *Psicología educativa: un enfoque cognitivo*. McGraw-Hill. ↑Ver página 99
- Ausubel, D. (2012). *The acquisition and retention of knowledge*. Springer. ↑Ver página 98
- Basogain Olabe, X., Olabe Basogain, M. A. y Olabe Basogain, J. C. (septiembre de 2015). Pensamiento computacional a través de la programación: paradigma de aprendizaje. *Revista de Educación a Distancia*, 46(6), 2-35. ↑Ver página 99

- Boyer, C. (2010). *Historia de la Matemática*. Alianza Editorial. ↑Ver página 102
- Bruner, J. (2006). *Hacia una teoría de la instrucción*. Editorial Limusa. ↑Ver página 99
- Bruner, J. (2009). *Actos de significado*. Alianza Editorial. ↑Ver página 98
- Bugliarello, G. (2002). The social function of Engineering: A current assessment. En *Engineering as a social Enterprise* (pp. 29-42). National Academy Press. ↑Ver página 101
- Cao, L. (2018). *Data science thinking*. Springer. ↑Ver página 101
- De Zubiría, J. (mayo de 2007). *Los modelos pedagógicos* [Presentación de conferencia]. Encuentro Nacional de Pedagogía, Universidad del Cauca, Popayán (Cauca, Colombia). ↑Ver página 99
- Estrada Esponda, R. (Julio de 2017). La lectura y la escritura como herramientas pedagógicas para la enseñanza de Ingeniería de Software. *Revista Educación en Ingeniería - ACOFI*, 12(24), 83-88. ↑Ver página 102
- Johnson, D. y Wetmore, J. (2008). *Technology and society: Building our sociotechnological future*. The MIT Press. ↑Ver página 101
- Ladino Moreno, E. O., García Ubaque, C. y Pineda Jaimes, J. A. (enero de 2021). Desarrollo de una aplicación móvil para el aprendizaje interactivo en problemas de ingeniería civil: aplicación a la hidráulica de canales abiertos. *Tecnura*, 25(67), 53-70. <https://doi.org/10.14483/22487638.17820>. ↑Ver página 99
- Lindsay, D. (2011). *Scientific writing thinking in words*. CSIRO Publishing. ↑Ver página 102
- Llanos Mosquera, J. M. (julio de 2021). Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en IA para el aprendizaje de la programación. *Tecnura*, 25(69), 196-214. <https://doi.org/10.14483/22487638.16934>. ↑Ver página 99
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2016). *Compendio estadístico de la educación superior colombiana*. https://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-article-360743.html?_noredirect=1. ↑Ver página 98
- Padilla Escorcía, I. A. (abril de 2022). Recursos tecnológicos utilizados por profesores universitarios en carreras de ingeniería. *Tecnura*, 26(72), 147-166. <https://doi.org/10.14483/22487638.18277>. ↑Ver página 97
- Trejos Buriticá, O. I. y Muñoz Guerrero, L. E. (enero de 2022). Estrategia de aprendizaje de la programación apoyado en aprendizaje. *Tecnura*, 26(71), 111-123. <https://doi.org/10.14483/22487638.15309>. ↑Ver página 98




Watson, A. y Watson, G. (2013). Transitioning STEM to STEAM: Reformation of engineering education. *The Journal for Quality and Participation*, 36(1), 1-5. ↑Ver página 98

Yakman, G. y Lee, H. (2012). Exploring the exemplary STEAM education in the U.S. as a practical education framework for Korea. *Journal of The Korean Association For Science Education*, 32(6), 1072-1086. ↑Ver página 100



Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas

Wastewater treatment in Colombia and bioelectrochemical systems, uses and perspectives

Fabián Andrés Bustos Murillo ¹, Álvaro Ervey Pulido Aponte ² y Hernán Mauricio Rivera Escobar ³

Fecha de Recepción: 13 de mayo de 2022

Fecha de Aceptación: 18 de agosto de 2022

Cómo citar: Bustos-Murillo, F. A., Pulido-Aponte, A. E., Rivera Escobar, H. M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111-143. <https://doi.org/10.14483/22487638.19390>

Resumen

Contexto: En Colombia, la baja cobertura de plantas de tratamiento de aguas residuales conlleva a una compleja problemática ambiental, ya que estas aguas son usadas generalmente como sistemas de riego para cultivos y, en ocasiones, para el consumo humano en zonas rurales.

Objetivo: Informar acerca del saneamiento básico de las aguas residuales, los sistemas de tratamiento, el uso de microorganismos exoelectrogénicos en biorreactores, así como, los avances reportados frente al uso de los sistemas bioelectroquímicos y su posible implementación en Colombia.

Métodología: Se describe la capacidad y cobertura de los sistemas de tratamiento en las regiones del país; posteriormente, se presenta el fundamento teórico de los microorganismos que interactúan en los sistemas bioelectroquímicos; y se documenta el uso de esta tecnología para depurar contaminantes.

Resultados: El uso de bacterias exoelectroquímicas puede degradar carga orgánica contenida en las aguas residuales; los sistemas bioelectroquímicos aprovechan la capacidad de los microorganismos para transferir electrones a través de un circuito eléctrico por medio de voltaje, y obtener energía en forma de corriente eléctrica o combustibles con alto poder calorífico.

Conclusiones: La implementación de estos sistemas en Colombia requiere de inversión tecnológica, humana y de infraestructura en las principales plantas de tratamiento de aguas residuales, dada la complejidad y variabilidad de los fenómenos bioelectroquímicos asociados a la conversión de materia orgánica.

Palabras clave: sistema bioelectroquímicos (BES), celdas de combustible microbiano (MFC), celdas de electrólisis microbiana (MEC), plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), microorganismos eléctricamente activos.

¹Ingeniero químico, tecnólogo industrial. Estudiante de Ingeniería en Producción, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá D. C., Colombia. Email: fabiana.bustosm@utadeo.edu.co

²Magíster en Ingeniería, ingeniero en Control. Investigador I - Universidad de La Sabana. Bogotá D. C., Colombia. Email: alvaro.pulido@unisabana.edu.co

³Doctor en Ciencias Biomédicas, magíster en Bioquímica, especialista en Bioquímica Clínica, licenciado en Química. Departamento de Estudios Interdisciplinarios-IDEAD, Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. Grupo de investigación básica y traslacional-GIBAT. Email: hmauriciore@ut.edu.co

Abstract

Context: In Colombia, the poor coverage in wastewater plants entails a complex environment issue, because water is generally used to irrigation of agricultural crops and sometimes for human consumption in rural areas.

Objective: To brief about wastewater basic sanitation, the treatment systems, the use of exoelectrogenic microorganisms, as well, the progress reported about the use of bioelectrochemical system and the possible implementation in Colombia.

Methodology: The capacity and coverage of treatment systems are described by region; subsequently, present the microorganisms theoretical principles that interact in bioelectrochemical system; and the uses of this technology to remove pollutants is documented, for purify pollutants.

Results: The use of exoelectrochemical bacteria can oxidize organic pollutants present in wastewater; the bioelectrochemical systems take advantage the capacity of microorganisms to transfer electrons through an electrical circuit by means as voltage, and obtain energy by electric current or compounds with high calorific power.

Conclusions: The Implementation of that systems in Colombia required technological, human and infrastructure investment in the main wastewater plants, according to the complex and variability of the bioelectrochemical phenomes associated with the conversion of organic matter.

Keywords: Biochemical Systems (BES), Microbial fuel cell (MFC), Microbial electrolysis cell (MEC), wastewater treatment, Electroactive microorganisms.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	113
Metodología	114
Capítulo I. El tratamiento de aguas residuales en Colombia	115
Capítulo II. Los sistemas bioelectroquímicos (BES)	118
Capítulo III. Aplicación de los BES en la depuración de aguas residuales	124
Conclusiones	128
Referencias	129
Anexo 1	140
Anexo 2	141
Anexo 3	143

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP), de los $3,02 \times 10^{10}$ m³ de agua residual generados durante el año 2017 en Colombia, el 42,1 % recibió tratamiento en las principales ciudades del país, generando cerca de 100 010 toneladas de biosólidos (Be-doya *et al.*, 2013, Ibarra Prado *et al.*, 2018, Moreno *et al.*, 2017). Por otro lado, de los 1103 municipios, 492 cuentan con algún sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR), distribuidos en sistemas primarios (13,9 %) y secundarios (58,9 %, representados por lagunas de oxidación, humedales naturales y artificiales, trampas de grasas o fosas sépticas) (Gómez Vallejo *et al.*, 2014). En consecuencia y sumado a la limitada inversión en infraestructura y cobertura en las plantas de tratamiento, de los 75,95 m³/s de agua residual descargada en ríos y afluentes, tan solo 26,6 m³/s fueron tratados y el caudal restante fue vertido a las fuentes hídricas sin tratamiento alguno, lo que resulta en complejos impactos ambientales y sanitarios, puesto que ocasionalmente terminan en riego de cultivos en zonas rurales y consumo humano (Elieser, 2014, García *et al.*, 2019, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

El tratamiento de las aguas residuales tiene por finalidad remover la carga eutrófica, representada en materia orgánica, materia mineral, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, microorganismos patógenos, entre otros compuestos presentes en el agua (Bódalo *et al.*, 2002, Rojas, 2004). La remoción de estos contaminantes puede expresarse como un proceso productivo de operaciones fisicoquímicas o bioquímicas, que varían en términos de costo, tiempo, alcance y calidad del efluente, lo que permite clasificar el tratamiento convencional en preliminar, primario, secundario o biológico y terciario (Rodríguez Miranda *et al.*, 2015).

El tratamiento preliminar mediante cribado, desarenado y separación de grasas y aceites, se fundamenta en la remoción física de sólidos de diferente tamaño y sólidos de alta densidad, los cuales son removidos para evitar daños en los equipos en etapas posteriores al tratamiento (Torres, 2012); el tratamiento primario logra una desestabilización electrostática del material sedimentable, generalmente por coagulación y floculación; lo cual permite reducciones hasta del 35 % de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el 50 % de sólidos suspendidos sedimentables (SS) y el 40 % de coliformes (Ibarra Prado *et al.*, 2018, Lorenzo-Acosta, 2006, Torres, 2012). Luego, el tratamiento secundario incluye tecnologías basadas en procesos bioquímicos, donde las aguas residuales son sometidas a reacciones metabólicas mediadas por microorganismos con la capacidad de reducir la materia orgánica disuelta que se encuentra presente en el caudal vertido, bajo una serie de condiciones controladas, de lo que se obtienen remociones de hasta el 80 % de DBO (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2013, Torres, 2012, Vargas *et al.*, 2020). No obstante, para el año 2010, tan solo el 45 % de los STAR contaba con algún tipo de tratamiento secundario cuya implementación incluía diferentes procesos bioquímicos aerobios o anaerobios, para la remoción biológica de contaminantes presentes, como lagunas

abiertas, sistemas de lodos activados acoplados a sedimentadores secundarios, filtros percoladores o reactores de flujo ascendente (UASB por su sigla en inglés) (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010, Vargas *et al.*, 2020).

Sin embargo, la puesta en marcha y operación continua de estas plantas requiere un alto consumo energético; tan solo el uso de lodos activados demanda en promedio 0,5 kW/m³ para la oxidación de la materia orgánica presente en el agua residual; en consecuencia, se produce un aumento de la biomasa, el cual debe ser tratado para recuperar una fracción de la inversión realizada. Finalmente, son comercializados como biosólido, y transformados en gas metano, consumo que conlleva un costo de operación ineficiente en la depuración de estas aguas (Ali *et al.*, 2020, Buitrón y Pérez, 2011).

Recientemente, otros sistemas han despertado particular interés, como el caso de los bioelectroquímicos (BES), que se fundamentan en el uso de *Geobacter* o *Shewanella*, microorganismos que poseen la maquinaria molecular capaz de acoplar una serie de proteínas de membrana con actividad catalítica *redox* sobre sustratos orgánicos, lo que conduce a una transferencia a nivel extracelular de electrones (Kadier *et al.*, 2016, Shi *et al.*, 2007). Así, el microorganismo, su capacidad de transferencia de electrones y la presencia de aguas residuales como sustrato, conforman un sistema bioelectroquímico aparentemente eficiente, que aprovecharía las diferencias de potencial eléctrico para la degradación del material contaminante, como proyección de una alternativa sostenible en el aprovechamiento del potencial de óxido reducción (*redox*) de la misma carga contaminante en el agua residual (Cui *et al.*, 2020, Harnisch *et al.*, 2011).

El objetivo de este artículo es contextualizar sobre la gestión ambiental del país referente al saneamiento básico de las aguas residuales, sus sistemas de tratamiento, los microorganismos exoelectrogénicos en condiciones operativas en el interior de un biorreactor, y los avances reportados frente al uso de los BES y su posible implementación en Colombia. Para esto, se describe la capacidad y cobertura de los sistemas de tratamiento del país especificados por región. Luego, se presenta el fundamento bioquímico, microbiológico y electroquímico de los microorganismos que interactúan en un sistema BES. Finalmente, se documenta sobre los usos de la tecnología BES en la depuración de contaminantes, sus limitantes y ventajas como alternativa en el tratamiento de las aguas residuales en Colombia.

METODOLOGÍA

Se realiza una minería de datos de documentos académicos y técnicos que representan la base del conocimiento del tema propuesto. Esta búsqueda se efectúa desde las diversas bases de datos y repositorios institucionales. Luego de un análisis riguroso, clasificación y evaluación de esta información, se discute la temática abordada que conduce a una postura crítica del artículo, lo que definió la estructura del manuscrito y su posterior divulgación en la revista científica.

Capítulo I. El tratamiento de aguas residuales en Colombia

El consumo de agua para uso doméstico en Colombia establecido por cada vivienda al mes varía en función de las condiciones ambientales; estos valores de demanda tienen un promedio de $10,60 \text{ m}^3/\text{mes}$ para climas fríos y hasta $15,44 \text{ m}^3/\text{mes}$ en climas cálidos (Santana *et al.*, 2015). Adicionalmente, el consumo de agua en la industria es de $2,73 \times 10^{10} \text{ m}^3$, distribuidos en los sectores agrícola (51,2%), energía (28,4%), pecuario (9,7%), acuícola (4,5%), minería (2,3%), hidrocarburos (1,2%), servicios (1,2%), industria (0,9%) y construcción (0,1%) (Moreno *et al.*, 2017). La acumulación de estas descargas genera en los ríos y afluentes municipales una alta concentración de carga orgánica; por ejemplo, el río Bogotá con $165\,525 \text{ ton/año}$ de DBO y $375\,743 \text{ ton/año}$ de DQO; los arroyos del Caribe con $30\,582 \text{ ton/año}$ de DBO y $124\,018 \text{ ton/año}$ de DQO, y en el río Porce con $67\,455 \text{ ton/año}$ de DBO y $126\,972 \text{ ton/año}$ de DQO (Orjuela *et al.*, 2010). A esto se suma que, en Colombia, las ciudades no cuentan con una cobertura operativa que garantice el tratamiento del ciento por ciento de sus aguas; valores que tienden a incrementarse, al menos en parte, como consecuencia del aumento en la densidad demográfica, que para el año 2025, se estima en 53 millones de habitantes; cerca del 79% concentrados en Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena y Bucaramanga (Pérez *et al.*, 2014, United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2020).

En la figura 1, se ilustra la cobertura de los STAR en las regiones de Colombia. Más del 60% de los municipios de las regiones Caribe y Orinoquía presentan al menos un STAR, correspondientes al 23% del total de municipios en Colombia. De otro lado, y aunque las regiones Andina y Pacífica concentran la mayor cantidad de municipios en el país (74,45%), su cobertura es inferior al 40% en la implementación de algún sistema de tratamiento. Además, del total de los municipios con presencia de un STAR, tan solo el 17,3% incluye sistemas preliminares y/o primarios de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el 82% cuenta con algún tipo de tratamiento secundario en su mayoría no convencional, como lagunas de oxidación, humedales naturales y artificiales, trampas de grasas o fosas sépticas (DANE, 2020b, Gómez Vallejo *et al.*, 2014).

En términos de capacidad, la región Andina abarca la mayor cantidad de caudal de agua residual tratada ($9,07 \text{ m}^3/\text{s}$), que resulta insuficiente al considerar que el 56% de la población colombiana habita en esta región, lo que a su vez representa un caudal tratado per cápita de $0,82 \text{ m}^3/\text{mes}$; entre tanto, la región Pacífica muestra un escenario más alentador, con un caudal tratado de $6,74 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,58 \text{ m}^3/\text{mes}$ de agua residual tratada por habitante.

Por otro lado, y aunque las regiones Caribe e insular cuentan con una mayor cobertura en cuanto a sistemas de tratamiento, la cobertura muestra un caudal medio de agua tratada por habitante de $5,58 \text{ m}^3/\text{mes}$ para la región insular, y $1,55 \text{ m}^3/\text{mes}$ en la región Caribe. Sin embargo, esta proporción sigue siendo insuficiente, si se considera que solo el 20% del consumo medio de agua doméstica por habitante es objeto de algún tipo de tratamiento (DANE,

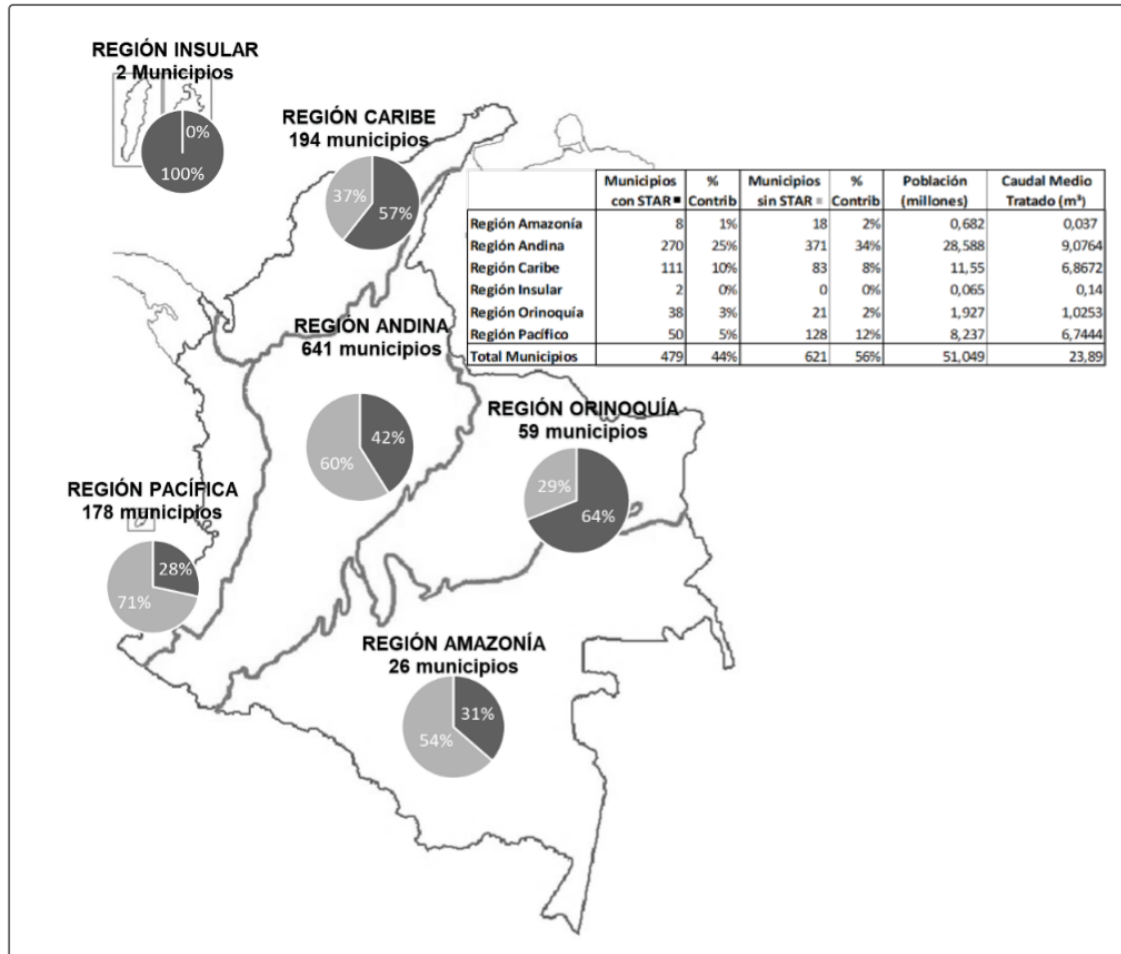


Figura 1. Representación de la cobertura y capacidad en m³ de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) en Colombia distribuido por regiones

Nota: DANE, 2020b y Gómez Vallejo *et al.*, 2014.

2020a, Gómez Vallejo *et al.*, 2014).

Esta información sugiere una compleja problemática ambiental, puesto que estos afluentes terminan descargando 1 059 734 ton/año de DBO en dos de las más importantes cuencas hidrográficas, el Magdalena y el Cauca, zonas con la mayor cantidad de carga orgánica acumulada y con la más baja cobertura y capacidad en implementación de sistemas de tratamiento (Orjuela *et al.*, 2010). Estas cifras se asocian a una baja disponibilidad e inadecuada administración de recursos públicos para construir, operar y mantener las PTAR, así como la limitada inversión en investigación asociada a la exploración de nuevas tecnologías para el uso, aprovechamiento y manejo adecuado de las aguas residuales. En la tabla 1, se describen las características de los

principales sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Colombia.

En términos generales, la implementación de un STAR se enfoca en maximizar la eficiencia de remoción de contaminantes y su uso puede estar directamente relacionado con aspectos económicos, ambientales y meteorológicos de la zona donde se implementó el sistema de tratamiento (Rodríguez Miranda *et al.*, 2015). Colombia cuenta con algunas alternativas, como la sedimentación, lagunas de estabilización, humedales artificiales, reactores anaerobios, reactores aerobios o combinación de estos (Torres, 2012). En cuanto a la PTAR, y la selección de tecnologías a implementar, es necesario identificar y analizar los impactos ambientales, el alcance, las restricciones del proyecto y el estudio de las posibles operaciones unitarias que garanticen la eliminación de contaminantes con la mayor productividad y sostenibilidad (Rodríguez Miranda *et al.*, 2015).

Tabla 1. Tipos y características de los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales en Colombia

	Descripción	Tipo de tratamiento	VARIABLES de operación	Equipos utilizados	Insumos utilizados	Carga contaminante removida	% efic.	Salidas	Ventajas	Desventajas
medales oficiales	Extensiones de agua que utiliza plantas acuáticas y terrestres.	Primario-Extensivo	TRH = 256 h 23 °C < T < 24 °C pH = 7,0 - 9,9	Terrenos extensos. Canales de roca caliza. Grava de roca caliza e ígnea.	Vegetación depuradora. Microorganismos.	30 mg/L DBO5. 60 mg/L SST. 70mg/L Nitrógeno total	<60 <60 <77	No reporta.	Mejora su eficiencia al integrarse con otros STAR a bajo costo.	Sin tratamiento previo, puede afectar integridad vegetación.
lagunas de estabilización	Cuerpos de agua donde predomina la presencia de algas y bacterias.	Primario o Secundario-Extensivo	TRH = 76,38 h 20 °C < T < 28 °C pH = 7,0 - 8,8	Terrenos. Estanque anaerobio. Estanques facultativos.	NR	250 mg/L DQO. 180mg/L DBO5. 200 mg/L ST.	<45,5 <80 <25	Lodos. Olores (H2S).	Fácil instalación y operación.	Áreas extensas con tiempos de retención a y olores fuera
filtración-precipitación	Cambia la densidad de la carga orgánica.	Primario-Intensivo	TRH = 24 h	Cribado y desarenado. Sedimentador	FeCl3. Poli-electrolito aniónico.	205,22 mg/L DBO5. 93,09 mg/L DQO. 157,53 mg/L SST.	<34,1 <37,3 <61,6	Lodos no aprovechables.	Alta eficiencia de remoción de DBO5 y SST.	Alta generación de lodos consumo reactivos.
reactores biológicos	Uso de lodos activados enriquecidos en oxígeno.	Secundario-Intensivo	TRH = 7,35 h	Reactor de lodos aerobios (144 m3). Sedimentador secundario.	Ruminaza. Aireadores. Filtro biológico.	1 900 mg/L DBO5. 1 900 mg/L SST.	<90 <90	50-100 mL/g de lodos aprovechables.	Fácil instalación y operación.	Consumo de energía ocasionado por el suministro de oxígeno.
reactores biológicos aerobios	Uso de lodos activados sin presencia de oxígeno.	Secundario-Intensivo	TRH = 24 h pH = 7,3 - 8,15	Reactor UASB (15,2 m3)	Ruminaza. Filtro de gravilla.	140 mg/L DBO5. 98 mg/L SST.	<42,7 <90,4	Biogás.	Fácil instalación y operación.	Tiempo de estabilización del sistema superior a días.

TRH= tiempo de retención hidráulica.

Fuente: Correa Restrepo *et al.*, 2012, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (s.f.), Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014, Méndez Novelo *et al.*, 2012, Pabón y Suárez, 2009.

En los anexos 1 al 3, se enuncian algunas características de los tratamientos que se llevan en siete PTAR de Colombia, el tipo de tecnología implementado, así como, la caracterización fisicoquímica del afluente y el efluente.

La planta de Cañaveralejo ubicada en la ciudad de Cali cuenta con la capacidad para tratar 7,6 m³/s de agua residual, realiza tratamiento preliminar y primario por medio de cribado, sedimentación y desinfección respectivamente, con lo cual se logra la remoción hasta del 47 % de DBO y 68 % de SS ([Corporación Autónoma del Valle del Cauca, 2017](#), [Emcali, 2022](#)). Esta planta se caracteriza por tratar la mayor cantidad de agua residual en comparación con otras del país; además, cuenta con un sistema de tratamiento de lodos para la venta de compost y la posterior generación de metano utilizado para el sostenimiento energético de la planta ([Emcali, 2022](#)).

Entre tanto, la PTAR El Salitre de Bogotá implementó la segunda fase de tratamiento secundario, capta en promedio 4 m³/s de agua residual, correspondiente al 34 % del total de agua descargada, con una proyección a 2023 para la construcción de la PTAR Canoas, con proyección de una cobertura de tratamiento del 70 % en la ciudad, con caudal medio proyectado de 14 m³/s ([Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2020a](#), [Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2013](#)).

Una característica importante para el tratamiento de aguas residuales primario en las PTAR El Salitre y Cañaveralejo es el uso de insumos químicos como cloruro férrico y polielectrolito aniónico en los sedimentadores, que facilitan la coagulación/floculación de los sólidos sedimentables y se obtienen eficiencias en depuración de carga orgánica cercanas al 51 % de DBO ([Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. \(s. f.\)](#), [Emcali, 2022](#)).

Medellín cuenta con dos PTAR que incorporan tratamiento secundario, Aguas Claras y San Fernando; las cuales tratan hasta 9 m³/s de las aguas residuales generadas en el área metropolitana de Medellín, alcanzando hasta el 80 % en remoción de DBO, DQO y SS ([EPM, 2020](#)).

Algunos STAR y PTAR no cuentan con algún control en la caracterización del caudal tratado; en conjunto, garantizan un tratamiento del 43,2 % de las aguas residuales captadas, representadas en un caudal de 28,95 m³/s ([Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019](#)). Estos sistemas podrían incorporar nuevas aplicaciones biotecnológicas que mejoren la eficiencia y su capacidad.

Capítulo II. Los sistemas bioelectroquímicos (BES)

Durante el tratamiento secundario se hace recurrente el uso de microorganismos con la capacidad de degradar una amplia variedad de contaminantes, de acuerdo con la biodisponibilidad y el metabolismo de las cepas. Los procesos de digestión celular son utilizados para la obtención de energía a partir de la degradación de carga contaminante presente ([Parra Huertas, 2015](#), [Red Española de Compostaje, 2014](#)). El acondicionamiento de lodos facilita el rendimien-

to metabólico de los microorganismos, que está dado en tres etapas: a) hidrólisis de lípidos; b) polisacáridos y proteínas; c) acidogénesis, donde las bacterias generan alcoholes y ácidos orgánicos como el ácido butírico, propiónico y acético a partir de los monómeros hidrolizados. Los productos generados son oxidados en acetato e hidrógeno en la fase de acetogénesis, para finalmente ser transformados en metano mediante reacciones de metanogénesis; proceso durante el cual el 90 % de la energía disponible se convierte en gas metano, y el restante se destina al crecimiento celular (Parra Huertas, 2015, Red Española de Compostaje, 2014).

Las aguas residuales que son tratadas mediante sedimentación primaria contienen carga orgánica constituida por proteínas (12-30 %), carbohidratos (6-16 %) y lípidos (19-80 %); composición que puede variar según el tipo de agua residual descargada (Sophonsiri y Morgenroth, 2004). El uso de microorganismos exoelectrogénicos a escala industrial contribuye con el desarrollo de tecnologías que aprovechan su potencial biológico para mejorar el tratamiento secundario y producir energía, hidrógeno u otros productos con valor comercial en el mercado (Buitrón y Pérez, 2011, Kadier *et al.*, 2016).

La configuración básica del BES es similar al funcionamiento de una pila electrolítica (Gude, 2018, Hamelers *et al.*, 2010, Kadier *et al.*, 2020); como se ilustra en la figura 2, el ánodo recibe los electrones generados durante la oxidación de las bacterias exoelectrogénicas y el cátodo actúa como electrodo que recibe los electrones para la posterior reducción de compuesto (Harnisch *et al.*, 2011, Meena *et al.*, 2019, Romero Mejía *et al.*, 2012).

Los BES involucran procesos de respiración celular, y como resultado, ocurre una transferencia de electrones e hidrogeniones o protones desde la célula hacia el ánodo, que, al oxidarse, desplaza los electrones por el circuito eléctrico y los hidrogeniones mediante una membrana de electrolito polimérico, lo que se traduce en un flujo de electrones al cátodo (Kadier *et al.*, 2016, Kadier *et al.*, 2020, Palanisamy *et al.*, 2019); para finalmente generar una fracción de energía expresada en corriente, hidrógeno, CO₂, con un aumento proporcional de biomasa; o por defecto, gas metano (CH₄), ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato, formiato), con bajo crecimiento celular mediante la oxidación incompleta del piruvato en medio anaerobio (Romero Mejía *et al.*, 2012, Singh y Mahapatra, 2021, Velvizhi y Venkata Mohan, 2015).

El comportamiento metabólico de los microorganismos que componen los BES cuenta con componentes de naturaleza proteica responsables del proceso de respiración celular en la membrana, con su correspondiente transferencia de electrones, a través de esta. Las bacterias como *Shewanella* y *Geobacter* son microorganismos gram negativos, quimiorganótrofos, que realizan metabolismo a partir de la degradación de compuestos orgánicos, poseen membrana citoplasmática impermeable con la capacidad de respirar mediante fosforilación oxidativa o fosforilación a nivel de sustrato.

En cuanto a la transferencia intermembranal de electrones, es consecuencia de la presencia de proteínas con homología de la familia citocromo C en la membrana citoplasmática, proteínas con una estructura grupo hemo, que permite la reducción del ion férrico Fe⁺³ a ferroso Fe⁺²

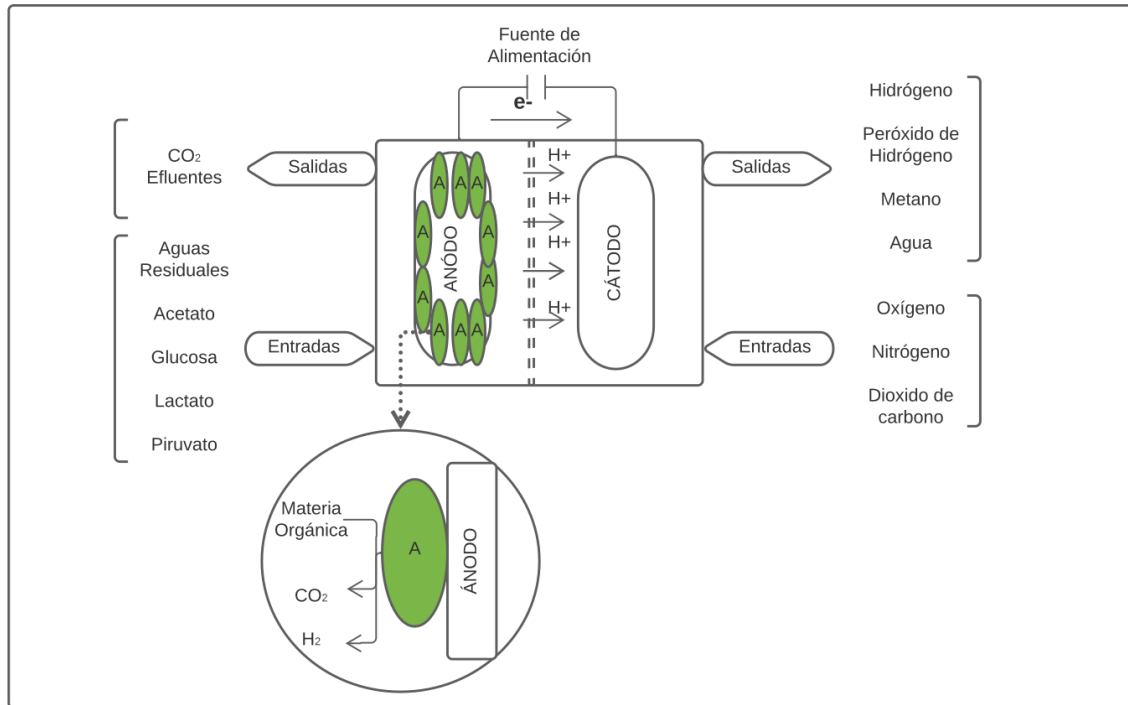


Figura 2. Representación de los BES en sus diferentes configuraciones
Fuente: European Commission, 2013; Hamelers *et al.*, 2010; Kadier *et al.*, 2016.

(Figura 3) (Rabaey *et al.*, 2009, Romero Mejía *et al.*, 2012).

El hierro (Fe) desempeña un rol importante como aceptor final de electrones mediante reacciones acopladas a un proceso de oxidorreducción (*redox*); en consecuencia, favorece una actividad electroquímica en el espacio intermembranal del microorganismo (Shi *et al.*, 2007). Las bacterias exoelectrogénicas como *Geobacter* y *Shewanella* cuentan con una gran cantidad de citocromos C, 111 y 42, respectivamente, en comparación con su par más conocido, *Escherichia coli*, con tan solo 7, esenciales para mantener la respiración celular y acelerar la transferencia de electrones y, por ende, su capacidad metabólica para el sostenimiento de la célula o la síntesis de productos (Shi *et al.*, 2007).

Estos microorganismos tendrían el potencial de oxidar la carga orgánica presente en las aguas residuales a través de rutas metabólicas como la glucólisis, lipólisis y desaminación, promoviendo la formación de piruvato y acetilo que finalmente se traduce en la reducción de moléculas energéticas como el NADH⁺ y FADH₂ (Liu, 2016, Rabaey *et al.*, 2009, Rodwell *et al.*, 2016). Estas moléculas que tienen una carga energética alta son conducidas hacia la membrana citoplasmática para realizar procesos de respiración celular a través de proteínas *redox* similares al citocromo C, ya mencionado, y realizar el transporte de la cadena de electrones y la fosfo-

rilación oxidativa hasta obtener adenosín trifosfato (ATP) (Shi *et al.*, 2007, Singh y Mahapatra, 2021). Estos procesos pueden generar en condiciones aerobias más de 108 moles de ATP por cada mol de lípido, 36 moles de ATP por mol de glucosa y al menos 4 moles de ATP por mol de aminoácido (Liu, 2016, Rodwell *et al.*, 2016). Entre tanto, la respiración anaerobia promueve el transporte rápido de electrones para la generación de CO₂, nitritos, nitratos y sulfatos, los cuales sirven como aceptores finales en el transporte de electrones en el cátodo (Kadier *et al.*, 2016, Kadier *et al.*, 2020).

Un factor de éxito para la implementación del BES, es la energía liberada a partir del potencial de la carga orgánica presente en el sistema, el cual depende del estado de oxidación del sustrato que será metabolizado por la biomasa y corresponde a la cantidad de electrones que pueden ser liberados por el microorganismo exoelectrogénico (potencial *redox*) (Rabaey *et al.*, 2009).

La cantidad de electrones es proporcional al número de moles de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno del compuesto presente en la carga orgánica, así como, de su estado de oxidación. Se estima en promedio obtener 13,5 MJ por cada kilogramo de biomasa expresada en carga orgánica de DBO presente en el BES; sin embargo, la energía neta del sistema depende de la tecnología a aplicar, del sustrato a ingresar al BES y del producto esperado (energía expresada en corriente o en masa de los compuestos sintetizados en el cátodo) (Rabaey *et al.*, 2009, Singh y Mahapatra, 2021).

$$\text{Balance de electrones} = 4 + \frac{\text{Mol de H} - 2 \text{ Mol de O} - 3 \text{ Mol de N}_2}{\text{Mol de C}} \quad (1)$$

Con respecto a su actividad electroquímica, las reacciones en los BES pueden ser espontáneas y ocurren cuando el potencial de la reacción es mayor a cero, y suceden deliberadamente de acuerdo con la velocidad de reacción; y no espontáneas, cuando el potencial es menor a cero, estas no suceden en la naturaleza, a menos que se cuente con estímulo de corriente eléctrica. En cualquiera de los dos escenarios, se suele ingresar dos placas (electrodos) con capacidad oxidante (ánodo) y reductor (cátodo), interconectados a través de un circuito eléctrico que permite el flujo de electrones entre ambos electrodos, lo que genera una diferencia de potencial en el sistema que facilita a los electrones ingresar (electrólisis) o salir de la pila o dispositivo (Brown *et al.*, 2014).

Al respecto, para el montaje de una pila, es necesario que la reacción sea espontánea, con el fin de desplazar los electrones oxidados en el ánodo hacia el cátodo, el cual reduce el compuesto que se encuentra en solución y, como resultado, genera corriente eléctrica producto de la transferencia de electrones. Por otro lado, los procesos de electrólisis facilitan la formación de compuestos mediante reacciones no espontáneas, en donde la entrada de corriente eléctrica al sistema favorece la reacción. Para esto, se hace necesario que el diseño del sistema incluya una placa reductora y un cátodo inerte que no participe en la reacción, pero que permita el flujo

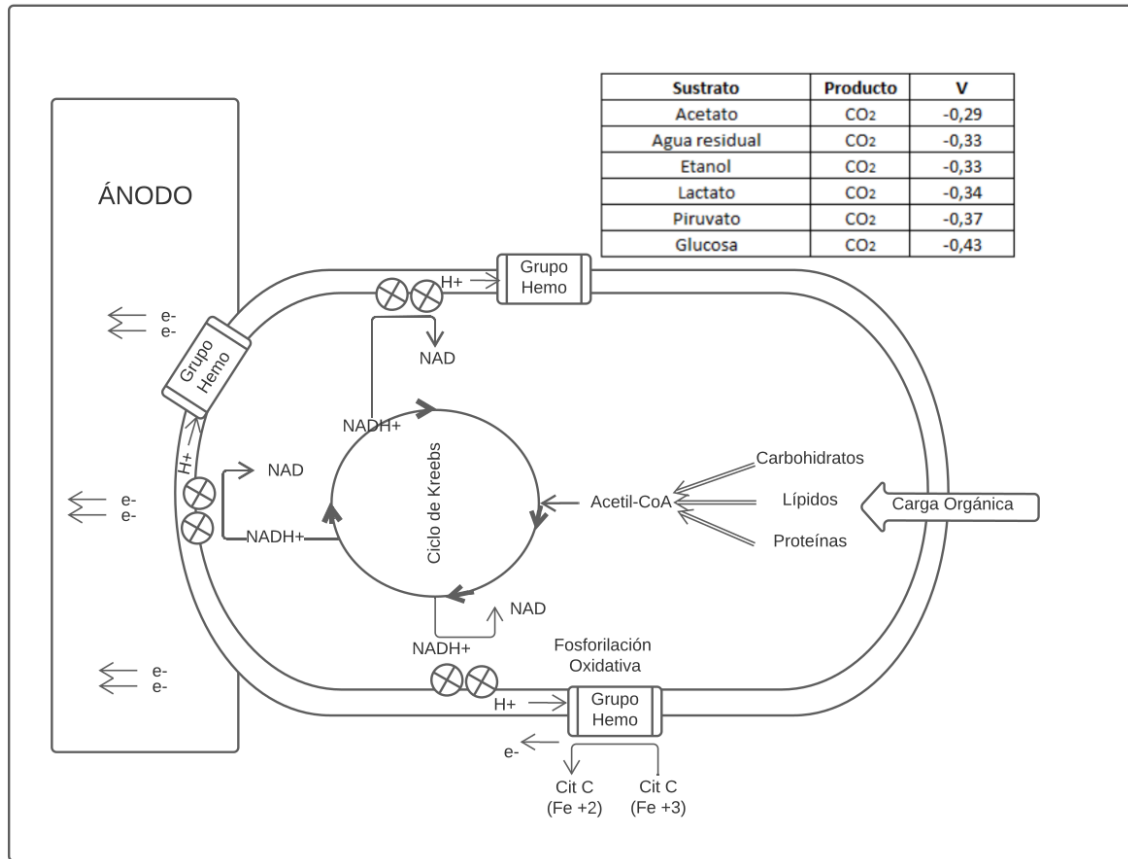


Figura 3. Esquema metabólico de los microorganismos exoelectrogénicos, para la generación de electrones hacia el ánodo

Fuente: [Kadier et al., 2020](#); [Rabaey et al., 2009](#); [Romero Mejía et al., 2012](#); [Shi et al., 2007](#)

de electrones por el circuito eléctrico ([De Kuyper, 2019](#), [Laidler, 2018](#)). Bajo este fundamento, se ha trabajado en dos tecnologías que abarcan los BES, las celdas de combustible microbianas (MFC) y las celdas de electrólisis microbiana (MEC). Las MFC recuperan energía eléctrica por la reacción espontánea causada por el metabolismo de los microorganismos exoelectrogénicos ([European Commission, 2013](#), [Rabaey et al., 2009](#)); mientras las MEC requieren de una alimentación o flujo de electrones para impulsar las reacciones no espontaneas dentro del sistema, lo que implica ajustar las condiciones del sustrato ingresado, temperatura, presión y pH en el que se encuentra el ánodo, junto con la diferencia de potencial del sistema ([Kadier et al., 2020](#), [Rabaey et al., 2009](#), [Singh y Mahapatra, 2021](#)).

La selección de la tecnología dependerá de la naturaleza química del material orgánico y su potencial degradación. Para implementar un MFC o MEC, es necesario mantener condiciones anaerobias en el cátodo, para que moléculas energéticas (NADH⁺ y FADH₂) se oxiden,

se reduzca el ion Fe^{+3} y se genere la posterior oxidación por enzimas similares al complejo III (Rabaey *et al.*, 2009). La solución en el cátodo debe permanecer en ausencia de oxígeno, así se facilita que el microorganismo transfiera los electrones desde el ánodo hacia el cátodo, ya sea para la generación de corriente eléctrica o la reducción de compuestos químicos, el cual varía de acuerdo con el potencial eléctrico aplicado al BES (Rabaey *et al.*, 2009, Velvizhi y Venkata Mohan, 2015).

En este punto, la elección del par de electrodos (ánodo y cátodo) dependerá de la espontaneidad de la reacción, basada en el cálculo del potencial eléctrico del sistema, dado por la diferencia entre los potenciales eléctricos de cada reacción independiente $E^0 = V_{red} - V_{oxd}$, determinados de acuerdo con el sustrato a ingresar al ánodo y cátodo según corresponda (figura 3) (Kadier *et al.*, 2020, Singh y Mahapatra, 2021).

Liu *et al.*, 2005, con el fin de analizar la actividad electroquímica de los microorganismos presentes en el reactor, diseñaron un modelo experimental para medir la proporción de hidrógeno que se genera de la oxidación del acetato en una celda de combustible microbiana (MEC). El reactor contaba con dos cámaras (cátodo y ánodo), acopladas entre sí por un tubo de 15 cm que contenía una membrana para el intercambio de protones (PEM NAFION 117); el ánodo constituía un electrodo de tela de carbón simple, que se alimentó con acetato y lodos activados inoculados previamente con agua residual doméstica en una celda de combustible; el cátodo contenía un papel de carbón con $0,5 \text{ mg/cm}^3$ de platino (Pt). Ambas cámaras fueron purgadas con nitrógeno molecular (N_2) y selladas para evitar la interferencia del oxígeno en el sistema. Como resultado, se obtuvo una recuperación de hidrógeno molecular (H_2) hasta del 90 % a partir del acetato, cuando el voltaje de alimentación fue de 0,9 V; lo que sugiere actividad por parte de los microorganismos presentes en los lodos con capacidad de oxidar el acetato para su posterior transferencia de electrones, y transformación en el cátodo de los iones H^+ a H_2 .

Los microorganismos exoelectrogénicos cuentan con filamentos Pili, que en los sistemas BES han mostrado una capacidad de transferir los electrones resultantes de los procesos redox. Se ha identificado que estas fibras proteicas tienen una propiedad para transportar electrones directamente desde la membrana citoplasmática del microorganismo hacia el ánodo (Revelo *et al.*, 2013). Esto fue evidenciado en el diseño de un BES para remover colorantes azoicos presentes en aguas residuales; durante el ensayo, se operó el sistema con una entrada constante de voltaje o sistema abierto y con interrupciones de voltaje o sistema cerrado y las celdas microbianas pasaron por un microscopio SEM (Cui *et al.*, 2020). Se observaron unos filamentos similares a los Pili, cuando el sistema se encontraba abierto o disponible para generar un potencial eléctrico; sin embargo, en ausencia de voltaje, se observó una aglomeración de microorganismos, sugiriendo que esta actividad microbiana es requerida para asegurar la transferencia de electrones a través de las celdas.

Capítulo III. Aplicación de los BES en la depuración de aguas residuales

La evaluación de los BES en los diferentes sectores económicos ha sido poco explorada. La tabla 2 presenta algunas de las aplicaciones industriales de los BES, el tipo de sistema implementado, así como las condiciones de operación del sistema y la eficiencia resultante. La implementación de los BES en la depuración del agua residual requiere condiciones controladas que garanticen la estabilidad de los microorganismos durante el proceso; así como, el análisis de los factores que alteran el desempeño de los BES durante su operación, por ejemplo, la variación de la temperatura, el pH y la composición química particular del residuo blanco de oxidorreducción (Kadier *et al.*, 2020, Liu, 2016, Velvizhi y Venkata Mohan, 2015).

Al respecto, González del Campo *et al.*, 2013 determinaron el efecto de los cambios de temperatura sobre los microorganismos. La metodología incluyó una celda de combustible microbiana con un manto de lodos procedentes de una PTAR en el ánodo y aire comprimido en el cátodo. Para identificar el perfil de temperatura respecto a la tasa de remoción de carga orgánica, se varió la temperatura en un rango (20 °C-40 °C). Aunque no se reportó una caracterización del lodo activado, la mezcla de microorganismos registró una corriente eléctrica máxima de $2,4 \times 10^{-6}$ A, cuando el sistema alcanzó una temperatura de 40 °C, lo que sugiere una relación proporcional frente a la actividad celular en función de la temperatura del sistema. No obstante, para la incorporación de varios microorganismos, la actividad microbiana neta óptima del sistema puede variar en función de la capacidad térmica de las bacterias (Liu *et al.*, 2005, Liu, 2016).

Otro caso de estudio fue desarrollado en el Reino Unido, con una planta piloto MEC. El objetivo fue determinar la factibilidad en la producción diaria de 1 L de H₂ a partir del tratamiento de 100 L de agua residual durante las cuatro estaciones del año (European Commission, 2013). La operación de la planta dio como resultado 2,3 k/g DQO en un rango de temperatura de 2 °C-21 °C y recuperación de energía promedio del 70 % en forma de H₂ (European Commission, 2013).

Además del efecto de la temperatura, los microorganismos también presentan una alta sensibilidad a los cambios de pH, estos afectan la actividad celular al producir alteraciones en la membrana y limitar la absorción de nutrientes (Khanna y Das, 2013, Liu, 2016). Para evaluar el efecto del pH y encontrar una región estable, Khanna y Das, 2013 usaron almidón y sacarosa en botellas de suero para la producción de H₂, a diferentes niveles de pH. Como resultado, se reportó una producción de H₂, a un pH inicial de 5,0, y una producción inferior de H₂ con un pH inferior a 4,5, región en la cual el sistema produjo ácidos grasos volátiles como acetato, butirato y propionato.

Entre los compuestos orgánicos que son susceptibles de degradación mediada por procesos redox se encuentran los colorantes azoicos, como el amarillo de alizarina, un compuesto de uso común en los sectores farmacéutico, de alimentos y textil. Para esto, se trabajó un diseño expe-

Tabla 2. Comparativo de los sistemas bioelectroquímicos (BES), estudios de caso en diferentes sectores económicos para el tratamiento de aguas residuales

Modelo experimental	Sustrato	Tipo de electrodo	Voltaje aplicado	Operación		Cosustrato	Porcentaje de eficiencia (%)	Observaciones
				Preoperación	Sistema			
Sistema bioeléctrico (BES) con bacterias eléctricamente activas (AEB)	Amarillo de alzarina en solución buffer.	Cátodo=Grafito Ánodo=Ag/AgCl	-0,28 V	Inoculación de lodo anaerobio.	Celda de electrolisis microbiana (MEC).	Acetato	95 %	La cámara está en operación discontinua de voltaje para analizar la actividad de EAB.
Reactor de electrólisis biocatalizado (ARB- BES)	Amarillo de alzarina en solución buffer.	Ánodo y cátodo= barra de grafito granular, llenado herméticamente de titanio.	0,7 V	El lodo anaeróbico es obtenido de un ARB piloto de Shaoxing.	Sistema de flujo ascendente integrado a MFC.	Acetato butirato	95 %	Lodo inoculado con glucosa durante 90 días para facilitar la producción de ácidos grasos volátiles.
Celdas de combustible microbiano (MFC)	Piridina en solución buffer.	Ánodo de grafito. Cátodo de grafito recubierto en Pt.	0,2 V	El lodo anaerobio obtenido de la PTAR Liede de Guangzhou City.	MFC de cámara doble.	Glucosa	95 %	El lodo anaeróbico es inoculado con 1000 mg/L de glucosa hasta alcanzar 650 mV.
Reactor Batch SBR integrado a MFC	Agua residual industria farmacéutica	Ánodo en malla de acero SAE316. Cátodo en grafito.	MFC1 = 0,4 V MFC1 = 0,2 V	Inóculo tomado del agua residual del sistema.	Reactor secuencial Batch x(SBR) integrado a BES.	Glucosa	83,3 %	Proceso aerobio, debe conservar el agua residual a 4 °C.
Celdas de combustible integrado a celdas de electrolisis (MFC- MEC)	Agua residual residuos galvánicos	Ánodo MFC=Filtro de carbono. Cátodo MFC=Malla de acero inoxidable. Ánodo MEC=Filtro de carbono. Cátodo MEC=Tela de carbono recubierta de Pt.	-0,7 V	Inóculo de lodos a partir de otro MFC. Solución buffer de sulfato cúprico y sulfato de níquel en el cátodo.	Celda de combustible y electrolisis microbianas (MFC- MEC).	Acetato de sodio	En MFC 90 % en Cu En MEC 90 % en Ni	Tasa de remoción luego de 45 horas de tratamiento en MFC- MEC.
Celdas de combustible microbiano (MFC)	Agua residual compuesto halogenado	Ánodo y cátodo=barra de grafito granular.	-0,6 V	Inóculo de lodos con acetato de sodio.	MFC de cámara doble.	Acetato de sodio	En MEC 90 %	Se compara la eficiencia en remoción de MFC y MEC.

fuentes: Cui *et al.*, 2014; Cui *et al.*, 2020; León-Fernández *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2015 ; Yeruva *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2009.

rimental de BES que contaba con bacterias adheridas a sus electrodos (Cui *et al.*, 2014, Cui *et al.*, 2020). Para esto, Cui *et al.*, 2014 implementaron un reactor anaeróbico de cuatro compartimientos individuales, integrado a un sistema de bioelectrólisis con lodo anaeróbico proveniente de un reactor de aguas residuales, enriquecido previamente con glucosa y colorante azoico AYR, estimulado a diferentes voltajes y tiempos de retención hidráulica, sobre los que se midió por espectrofotometría los productos generados por la reducción de los colorantes (PPD) y (5-ASA). Se observó que, bajo estas condiciones experimentales, las diferencias de potencial eléctrico del orden de 0-0,5 V y con tiempo de retención hidráulica de 6 horas, lograron una tasa de remoción diferencial del AYR, con una eficiencia acumulada del 96 % y eficiencias parciales del 60 % para el primer compartimiento, 30 % en el segundo y menos del 10 % en los dos últimos compartimientos. No obstante, sumado a la falta de una caracterización fisicoquímica y biológica de los lodos utilizados, el diseño experimental no contó con los controles que permitieran afirmar que la depuración era causada por los microorganismos eléctricamente activos.

Además de lo ya mencionado, Cui *et al.*, 2020 desarrollaron una metodología alterna que mejoró parcialmente el BES en la reducción de AYR. Para esto, se instalaron siete reactores en paralelo, con electrodos de grafito conectados en serie a un electrodo de referencia de Ag/AgCl para el control del voltaje, manteniendo condiciones anaerobias por flujo de N₂ y alimentado con una solución de amarillo de alizarina a diferentes concentraciones (Hou *et al.*, 2016, Lovley y Phillips, 1988). Transcurridas 24 horas de funcionamiento de la celda microbiana, una concentración inicial de 70 ppm de AYR mostró una reducción entre el 95 %-98 %. La caracterización por secuenciación de última generación (NGS) de las bacterias usadas en este estudio reveló la presencia de siete cepas diferentes, una coincidió con *Geobacter* (Cui *et al.*, 2020, Liu *et al.*, 2017), pero se desconoce la capacidad de reducción del colorante presente directamente en aguas residuales con condiciones altamente oxidantes que puede afectar la supervivencia, proliferación y actividad metabólica de este tipo de microorganismos (Liu, 2016, Tortora *et al.*, 2006).

Por otro lado, los herbicidas de uso frecuente tienen compuestos como el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), molécula que cuenta con anillos aromáticos y compuestos halogenados como el cloro. El 2,4-D también ha sido un campo de estudio para los BES por la dificultad en su depuración en sistemas de tratamiento convencionales, debido al uso de metales pesados como catalizadores. León-Fernández *et al.*, 2019 evaluaron el rendimiento de una MEC y una MFC para deshalogenar el 2,4-D. Ambos sistemas fueron elaborados con dos celdas separadas por una membrana de intercambio iónico, en la que se alimentó el ánodo con lodo activado al 50 % del volumen previamente inoculado y acetato de sodio en solución buffer; el cátodo fue alimentado con 300 ppm de 2,4-D. Los resultados mostraron una remoción aproximada de 16,66 % de 2,4-D en MFC y 90 % en MEC; sugiriendo una deshalogenación del compuesto organoclorado, posiblemente asociado al aumento de cloruros Cl⁻ en el cátodo y oxidación del acetato de sodio en el ánodo.

En otro estudio, se realizó una mejora de un reactor biológico secuencial (SBR) aerobio-anóxico mediante la integración un BES (Velvizhi y Venkata Mohan, 2011, Velvizhi y Venkata Mohan, 2015, Yeruva *et al.*, 2016). Las celdas del BES contenían un ánodo de malla de acero inoxidable completamente sumergido al sistema, el cátodo de grafito no catalizado, sumergido parcialmente y expuesto a condiciones atmosféricas (Yeruva *et al.*, 2016); se midieron los parámetros de DQO, sólidos disueltos totales, pH, nitratos y sulfatos. Se observó una reducción de 25 000 mg/L de DQO cuando el sistema integrado SBR-BRS operó bajo condiciones anaerobias. El sistema mostró una eficiencia de remoción superior al 83,33 % en SS, nitratos y sulfatos, sugiriendo que estos BES son compatibles con sistemas de tratamiento previamente acoplados para aumentar la tasa de remoción de contaminantes.

En cuanto a la depuración de algunos compuestos farmacéuticos como la piridina. Luo *et al.*, 2009 diseñaron una celda microbiana con grafito (G-MFC) con dos cámaras separadas por una membrana. Al ánodo, se ingresaron concentraciones controladas de glucosa y piridina, con posterior inoculación de un lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales enriquecido con glucosa como cosustrato, hasta alcanzar una salida de voltaje de 680 mV (Luo *et al.*, 2009, Zhang *et al.*, 2009), se reportó una disminución de piridina 12 horas después de iniciar el sistema, para diferentes relaciones glucosa-piridina (Zhang *et al.*, 2009). Aunque el sistema tiene la capacidad de reducir la piridina sin la intervención del cosustrato, este resultado sugiere una interacción importante entre la concentración de la glucosa y el voltaje de la celda microbiana para la generación de energía.

Finalmente, en las aguas residuales generadas por procesos de galvanoplastia se encuentran altas concentraciones de metales pesados, y los métodos de tratamiento implican la inclusión de solventes metálicos con prolongados tiempos de retención en el sistema, resultando costosos e ineficientes en su depuración (Luo *et al.*, 2015, Meena *et al.*, 2019, Tejada Tovar *et al.*, 2021). Luo *et al.*, 2015 diseñaron una celda de combustible y una celda de electrolisis microbiana (MFC-MEC) para extraer los metales de cobre (Cu) y níquel (Ni). El MFC tenía dos cámaras, en el ánodo se ingresó agua residual con acetato de sodio; en el cátodo ingresó una solución de sulfato de níquel y sulfato cúprico. Los efluentes del cátodo de MFC ingresaron a un reactor MEC para aumentar la eficiencia de remoción de iones metálicos. Luego de 45 h de operación del reactor, se observó una remoción del 90 % de cobre en el MFC y un 90 % de níquel en el MEC por precipitación del compuesto. La metodología presentada por los autores contó con condiciones controladas de temperatura, composición electrolítica y pH en BES, y se observó una remoción de cobre y níquel, sugiriendo un posible método para la depuración de metales pesados en posteriores estudios que contengan este tipo de metales en las aguas residuales.

Otros trabajos en esta área se han enfocado en la evaluación de la dinámica poblacional bacteriana; como la cooperación y la competencia, y sus posibles implicaciones frente a la eficiencia en la generación de productos de interés humano (Liu, 2016). Particularmente, para los BES, el potencial en la capacidad de oxidación electroquímica es el resultado de complejas di-

námicas intrapoblacionales de las cepas inoculadas; por esta razón, en la práctica, se requiere de configuraciones en los reactores que aseguren la generación de cosustratos como los ácidos grasos volátiles, los cuales facilitan su metabolismo (Gude, 2018, Koch *et al.*, 2019).

Frente a los sistemas convencionales de tratamiento de agua residuales, los BES sugieren una alternativa novedosa y sostenible con potencial capacidad de degradar compuestos orgánicos. Tanto MFC como MEC promueven el aprovechamiento de energía en la degradación de compuestos (Kadier *et al.*, 2016, Khanna y Das, 2013, Meena *et al.*, 2019), operando a condiciones específicas de temperatura y pH, que afectan las interacciones poblacionales microbianas (European Commission, 2013). Al respecto, en la última década, algunos países desarrollados como Estados Unidos, Reino Unido y Australia, presentan avances significativos frente a los usos y aplicaciones preliminares de los BES, lo que ha permitido su implementación a escala industrial desde el uso de aguas residuales provenientes de la industria de alimentos dada su riqueza en biomoléculas (European Commission, 2013). Particularmente, para el diseño de las MFC, cuya finalidad es generar una corriente eléctrica como resultado de la actividad metabólica de los organismos ya mencionados, se han implementado procesos que aprovechan el agua residual doméstica bajo condiciones de temperatura, pH y voltajes de entrada/salida del proceso.

CONCLUSIONES

En la región Andina colombiana, de los 10,60 m³/mes de agua vertida, solo 0,82 m³/mes reciben algún tipo de tratamiento para su depuración, que alcanza a nivel nacional un máximo de 2,58 m³/mes per cápita, lo que evidencia la limitada cobertura en el tratamiento de aguas residuales tratadas por habitante (DANE, 2020a, Gómez Vallejo *et al.*, 2014).

Acorde con los informes de gestión y planeación estimados para el periodo 2020-2030, el panorama de inversión económica en Colombia, respecto al tratamiento de las aguas residuales es creciente (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2020b, EPM, 2020, Fundación Pachamama y Corporación del Valle del Cauca, 2011, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2018). Por otro lado, el Gobierno nacional promueve acciones encaminadas a la creación de sistemas de producción de energía a partir de fuentes renovables, al observar políticas públicas que incentivan el uso de nuevas tecnologías enfocadas a la producción de energía por degradación espontánea de los contaminantes presentes en las aguas residuales (Giral Ramírez *et al.*, 2017). Sin embargo, la inversión en investigación, desarrollo o implementación de tecnologías como los BES continúa inexplorada; más aún, por la absoluta dependencia de los BES a etapas previas del tratamiento primario y sus diversas implicaciones técnicas e ingenieriles de alto nivel que incluye, el uso de celdas electrolíticas, la adecuación de la red eléctrica del reactor, la adecuación de la subestación eléctrica para almacenar corriente, sin desconocer los respectivos sistemas de control y parámetros de diseño requeridos para

asegurar las condiciones operativas.

Pese a que la evidencia experimental ha descrito una actividad celular de los microorganismos exoelectrogénicos; los controles asociados a la inoculación y caracterización de las cepas, el tiempo de exposición y la composición de los compuestos presentes en las aguas residuales, que asegure la eficiencia o supervivencia de la población microbiana, es objeto de investigación y desarrollo. Así, los diseños experimentales implementados a la fecha no cuentan con los controles que aseguren qué cepas están presentes en estos BES, así como, la asociación funcional y eficiencia en la depuración mediada por los microorganismos eléctricamente activos; por lo anterior, se requiere avanzar en la caracterización de parámetros fisicoquímicos y biológicos de los lodos utilizados y de las condiciones de operación ante la implementación de un BES.

En general el diseño de las celdas de combustible microbianas (MFC) y las celdas de electrólisis microbiana (MEC) y sus diferentes combinaciones resultan eficaces para depurar o mejorar sistemas de tratamiento. Por un lado, los MFC han desarrollado soluciones efectivas para la obtención de corriente eléctrica en el proceso a partir de la oxidación de materia orgánica, este proceso aprovecha principalmente las aguas residuales de uso doméstico, con la facilidad de acoplarse a sistemas de tratamiento secundario convencionales para incrementar su eficacia. Entre tanto, los MEC se destacan en estudios experimentales de reactores con la capacidad de remover compuestos orgánicos de estructuras complejas, que, en la actualidad, son degradados mediante costosos métodos convencionales asociados al uso de reactivos químicos o tiempos prolongados de tratamiento. Estos sistemas podrían funcionar en diferentes zonas geográficas, dado el amplio rango en la temperatura de operación de las cepas inoculadas ([European Commission, 2013](#), [Liu et al., 2005](#)). Sin embargo, es necesario incluir investigaciones a escala piloto en donde se evalúe el alcance de un MFC respecto a la capacidad de abastecimiento de energía per cápita.

Sumado a lo anterior, los diseños experimentales relacionados son en condiciones ideales de operación; esto presenta un reto importante en la implementación de BES, ya que se debe garantizar el control de estas variables para aprovechar su máximo potencial de los microorganismos en BES ([Kadier et al., 2020](#)); condiciones que no son fácilmente alcanzables cuando se incluyen aguas residuales sustrato combustible para su degradación. Ante esto, se requieren considerables esfuerzos en investigación y desarrollo tecnológico en sistemas piloto, enfocados a determinar la eficacia real del sistema al ser expuesto a las aguas residuales y su interacción con otras cargas contaminantes, en especial atención para determinar el potencial eléctrico (E^0) del reactor cuando existen incontables compuestos sin caracterización química.

REFERENCIAS

- Aguas Mocoa S. A. E. S. P. (2021). *Equipo Técnico de Aguas Mocoa visita PTAR de Tuluá y Caicedonia, Valle del Cauca, en el marco del Plan Maestro de Alcantarillado*. <https://www.aguasmocoa.gov.co/2021/02/10/equipo-tecnico-del-plan-maestro-de-alcantarillado-visita-ptar-de-tuluay-caicedonia-valle-del-cauca/> ↑Ver página
- Ali, I., Naz, I., Peng, C., Abd-Elsalam, K. A., Khan, Z. M., Islam, T., ... Sehar, S. (2020). Sources, classifications, constituents, and available treatment technologies for various types of wastewater: An overview. En K.A. Abd-Elsalam y M. Zahid (eds.), *Aquanano-technology: Applications of nanomaterials for water purification* (pp. 11-46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821141-0.00019-7>. ↑Ver página 114
- Bedoya, K., Acevedo, J., Peláez, C. y Agudelo, S. del P. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Pública*, 15(5), 778-790. https://www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/assets/rsap/v15n5/v15n5a13.pdf. ↑Ver página 113
- Bódalo, A., Gómez, E. y Fuensanta, M. (2002). *Química en Murcia 2002: 50 aniversario de los Colegios de Químicos en España*. Editum. https://books.google.com.co/books?id=19we0uKpM_AC&dq=sistemas+de+tratamiento+intensivos+y+extensivos&hl=es&source=gbs_navlinks_s. ↑Ver página 113
- Brown, T., LeMay, E., Murphuy, C., Bursten, B. y Woodward, P. (2014). *Química: la ciencia central*. (Vol. 12). Pearson Education. ↑Ver página 121
- Buitrón, G. y Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5-11. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDREVISTA=98&IDARTICULO=31582&IDPUBLICACION=3417>. ↑Ver página 114, 119
- Bustamante, C., Naranjo, J. y Ahumada, J. (2014). Determinación de la calidad ecológica del río Tuluá Valle del Cauca. *Revista Mutis*, 4(2), 35-43. <https://doi.org/10.21789/22561498.955>. ↑Ver página
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2014). *Por el cual se decide la solicitud de incorporación del costo de tratamiento de aguas residuales (CTR) en el costo medio de*

operación de alcantarillado (CMO) solicitada por la empresa Centroaguas S. A. E. S. P. del municipio de Tuluá, Valle del Cauca. https://cra.gov.co/documents/DTO_Res_CRA_No._691_de_2014.pdf. ↑Ver página 128

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2018). *Resolución CRA 826. Por la cual se resuelve la solicitud presentada por Empresas Públicas de Medellín E.S.P., respecto de la aprobación de la incorporación del costo de tratamiento de aguas residuales en el costo operativo particular de alcantarillado CPal, con ocasión de la entrada en operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Aguas Claras.* <https://www.cra.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad-entidad-autoridad/resolucion-cra-826-2018>. ↑Ver página 128

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). *Actualización Pomca Río Aburrá: Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica.* <https://www.corantioquia.gov.co/planes-de-ordenacion-y-manejo-de-la-cuenca-hidrografica-pomca/> ↑Ver página

Corporación Autónoma del Valle del Cauca. (2017). *Evaluación regional del agua del Valle del Cauca.* https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-10/EVALUACION_REGIONAL_AGUA_Ajustes2018_2.pdf. ↑Ver página 118

Correa Restrepo, G., Cuervo Fuentes, H., Mejía Ruíz, R. y Aguirre, N. (2012). Monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, Colombia. *Producción Más Limpia*, 7(2), 36-51. <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/263>. ↑Ver página 117

Cui, D., Cui, M. H., Liang, B., Liu, W. Z., Tang, Z. E. y Wang, A. J. (2020). Mutual effect between electrochemically active bacteria (EAB) and azo dye in bio-electrochemical system (BES). *Chemosphere*, 239, 124787. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124787>. ↑Ver página 114, 123, 125, 126

Cui, D., Guo, Y.-Q., Lee, H.-S., Wu, W.-M., Liang, B., Wang, A.-J. y Cheng, H.-Y. (2014). Enhanced decolorization of azo dye in a small pilot-scale anaerobic baffled reactor coupled with biocatalyzed electrolysis system (ABR-BES): A design suitable for scaling-up. *Bioresource Technology*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.165>. ↑Ver página 125, 126

De Kuyper, J. C. V. (2019). Baterías de litio. En *Principios y aplicaciones de la energía fotovoltaica y de las baterías* (pp. 103-122). Ediciones UC. <https://doi.org/10.2307/j.ctvkjb50j.12>. ↑Ver página 122

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020a). Cuenta ambiental y económica de flujos del agua. *Boletín Técnico*, 1-13. <https://www.dane.gov>.

[co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuenta-del-agua/Boletin-tecnico-cuenta-ambiental-y-economica-del-agua-2018p.pdf](#). ↑Ver página 115, 128

Departamento Administrativo Nacional de Estadística(DANE). (2020b). *Serie departamental de población por área, para el periodo 2018-2050*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>. ↑Ver página 115, 116

Elieser, E. G. (2014). Daños a la salud por mala disposición de residuales sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(2), 270-277. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032014000200011&nrm=iso. ↑Ver página 113

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (s. f.). *Plegable técnico PTAR El Salitre*. https://www.acueducto.com.co/guatoc/Archivos/PLEGABLE_TECNICO_PTAR_SALITRE.pdf. ↑Ver página 117, 118

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2020a). *PTAR Canoas*. https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-canoas!/ut/p/z0/fYxBCoMwEAC_4iXnXT2EXqWitAdBbEFzkVWCpI1ZTWLp85v2AT3OMAw06EE5epmFomFHNvGg5\CjbM-YnLJq6ukhsy-JWV829kF0OV1D_g3Qwj31XjaiZXdTvCP3GPpJ1fvwZF0cdBB7hIG\9YIK2TSVIL. ↑Ver página 118

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2020b). *Informe mensual de actividades*. Diciembre. https://www.acueducto.com.co/wps/wcm/connect/EAB2/dc990997-22e2-4bce-99e0-cc1bc96c5847/INFORME+FINAL+DICIEMBRE+2020.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_K862HG82NOTF70QEKDBLFL3000-dc990997-22e2-4bce-99e0-cc1bc96c5847-nu3r5a9. ↑Ver página 128

Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado (IBAL). (2017). *PTAR El Tejar*. <https://www.ibal.gov.co/el-tejar>. ↑Ver página

Empresas Municipales de Cali. (2022). *Documento de evaluación integral a prestadores. Capítulo técnico operativo servicios de acueducto y alcantarillado*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/5.%20Capitulo%205%20-%20T%C3%A9cnico%20Acueducto%20y%20Alcantarillado.pdf> ↑Ver página 118

Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2020). *Informe de sostenibilidad 2019*. <https://www.grupo-epm.com/site/Portals/22/Informesdesostenibilidad/Informedesostenibilidad2019.pdf?ver=2020-03-24-102613-407>. ↑Ver página 118, 128

- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (s. f.). *Preguntas frecuentes - Planta de tratamiento de aguas residuales de Bello*. <https://www.grupo-epm.com/site/portals/22/Preguntasfrecuentes.pdf> ↑Ver página
- European Commission. (2013). Bioelectrochemical systems: Wastewater treatment, bioenergy and valuable chemicals delivered by bacteria. *Science for Environment Policy*, 5. ↑Ver página 120, 122, 124, 128, 129
- Fundación Pachamama y Corporación del Valle del Cauca. (2011). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cali*. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/Cali/POMCHRioCali2011.pdf. ↑Ver página 128
- García, M., Vargas, N., Bernal, F., Vega, C., Duque, N., Arboleda, P., Roa, S., Jaramillo, O., Ceballos, J., Montoya, J., Contreras, C., Vesga, A., Peñalosa, M. del P., Onofre, C., Uribe, D., Guzmán, A., Rodríguez, C., Parada, G., González, J., ... Castañeda, C. (2019). *Estudio nacional del agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, y Embajada de Suiza en Colombia. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf ↑Ver página 113
- Giral Ramírez, W. M., Celedón Flórez, H. J., Galvis Restrepo, E. y Zona Ortiz, A. T. (2017). Redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano: Revisión de tema. *Tecnura*, 21(53), 119-137. <https://doi.org/10.14483/22487638.12396>. ↑Ver página 128
- Gómez Vallejo, J. C., González, G. P., Castaño, B. G., Castañeda, P. M., Galán, P. A., Casanova, S. L., Jiménez, M. A., Pineda, A., Puerto, C. F., Amézquita, G. A. y Castillo, D. M. (2014). *Informe técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Superintendencia Delegada para Acueducto, Alcantarillado y Aseo (Superservicios). <https://studylib.es/doc/8045806/informe-técnico-sobre-sistemas-de-tratamiento-de-aguas>. ↑Ver página 113, 115, 116, 128
- González del Campo, A., Lobato, J., Cañizares, P., Rodrigo, M. A. y Fernández Morales, F. J. (2013). Short-term effects of temperature and COD in a microbial fuel cell. *Applied Energy*, 101, 213-217. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.064>. ↑Ver página 124
- Gude, V. G. (2018). Integrating bioelectrochemical systems for sustainable wastewater treatment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(5), 911-924 <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1536-0>. ↑Ver página 119, 128
- Hamelers, H. V. M., Ter Heijne, A., Sleutels, T. H. J. A., Jeremiasse, A. W., Strik, D. P. B. T. B. y Buisman, C. J. N. (2010). New applications and performance of bioelectrochemical

systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 1673-1685. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2357-1>. ↑Ver página 119, 120

Harnisch, F., Aulenta, F. y Schröder, U. (2011). Microbial fuel cells and bioelectrochemical systems: Industrial and environmental biotechnologies based on extracellular electron transfer. En Moo-Young (ed.), *Comprehensive biotechnology* (pp. 643-659). Elsevier. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00462-1>. ↑Ver página 114, 119

Hou, Y. N., Liu, H., Han, J. L., Cai, W. W., Zhou, J., Wang, A. J. y Cheng, H. Y. (2016). Electroactive biofilm serving as the green synthesizer and stabilizer for in situ fabricating 3D nanopalladium network: An efficient electrocatalyst. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(10), 5392-5397. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00647>. ↑Ver página 126

Ibarra Prado, G., Laguna, A. y Rojano Sierra, J. A. (2018). *Análisis de la inclusión del cambio climático y el crecimiento verde en la regulación general*. <https://www.cra.gov.co/prensa/analisis-inclusion-del-cambio-climatico-crecimiento-verde-regulacion-general>. ↑Ver página 113

Kadier, A., Simayi, Y., Abdeshahian, P., Azman, N. F., Chandrasekhar, K. y Kalil, M. S. (2016). A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 427-443. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.008>. ↑Ver página 114, 119, 120, 121, 128

Kadier, A., Jain, P., Lai, B., Kalil, M. S., Kondaveeti, S., Alabbosh, K. F. S., Abu-Reesh, I. M. y Mohanakrishna, G. (2020). Biorefinery perspectives of microbial electrolysis cells (MECs) for hydrogen and valuable chemicals production through wastewater treatment. *Biofuel Research Journal*, 7(1). <https://doi.org/10.18331/BRJ2020.7.1.5>. ↑Ver página 119, 121, 122, 123, 124, 129

Khanna, N. y Das, D. (2013). Biohydrogen production by dark fermentation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(4), 401-421. <https://doi.org/10.1002/wene.15>. ↑Ver página 124, 128

Koch, C., Aulenta, F., Schröder, U. y Harnisch, F. (2019). Microbial electrochemical technologies: Industrial and environmental biotechnologies based on interactions of microorganisms with electrodes. En M. Moo-Young (ed.), *Comprehensive Biotechnology* (pp. 545-563). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09699-8>. ↑Ver página 128

Laidler, K. J. (2018). Historia de la electrólisis. *Educación Química*, 1(3), 128-132. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1990.3.66993>. ↑Ver página 122

- León-Fernández, L. F., Villaseñor, J., Rodríguez, L., Cañizares, P., Rodrigo, M. A. y Fernández-Morales, F. J. (2019). Dehalogenation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid by means of bioelectrochemical systems. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 854. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113564>. ↑Ver página 125, 126
- Liu, H., Grot, S. y Logan, B. E. (2005). Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environmental Science & Technology*, 39(11), 4317-4320. <https://doi.org/10.1021/es050244p>. ↑Ver página 123, 124, 129
- Liu, S. (2016). *Bioprocess Engineering: Kinetics, sustainability, and reactor design*. (2.^a ed.). Elsevier Inc. ↑Ver página 120, 121, 124, 126, 127
- Liu, Y. N., Zhang, F., Li, J., Li, D. B., Liu, D. F., Li, W. W. y Yu, H. Q. (2017). Exclusive extracellular bioreduction of methyl orange by azo reductase-free geobacter sulfurreducens. *Environmental Science and Technology*, 51(15), 8616-8623. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02122>. ↑Ver página 126
- Llanos, E. (2000). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo PTAR-C*. <https://silo.tips/download/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-caaveralejo-ptar-c-santiago-de-cali> ↑Ver página
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA: Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL(2), 10.17. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>. ↑Ver página 113
- Lovley, D. R. y Phillips, E. J. P. (1988). Novel mode of microbial energy metabolism: Organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(6), 1472-1480. <https://doi.org/10.1128/aem.54.6.1472-1480.1988>. ↑Ver página 126
- Luna-Pabello, V. M. y Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP: Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 32-55. [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70318-3). ↑Ver página 117
- Luo, H., Liu, G., Zhang, R. y Jin, S. (2009). Phenol degradation in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 147(2-3), 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.011>. ↑Ver página 125, 127
- Luo, H., Qin, B., Liu, G., Zhang, R., Tang, Y. y Hou, Y. (2015). Selective recovery of Cu²⁺ and Ni²⁺ from wastewater using bioelectrochemical system. *Frontiers of Environmental Scien-*

ce and Engineering, 9(3), 522-527. <https://doi.org/10.1007/s11783-014-0633-5>. ↑Ver página 125, 127

Meena, R. A. A., Yukesh Kannah, R., Sindhu, J., Ragavi, J., Kumar, G., Gunasekaran, M. y Rajesh Banu, J. (2019). Trends and resource recovery in biological wastewater treatment system. *Bioresource Technology Reports*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100235>. ↑Ver página 119, 127, 128

Méndez Novelo, R. I., Chan, E. A., Vázquez, E. R., Castillo, E. R. y Espadas, A. E. (2012). Digestión anaerobia de efluentes de fosas sépticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XIII(3), 339-349. <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v13n3/v13n3a8.pdf>. ↑Ver página 117

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>. ↑Ver página 113, 114

Moreno, J., Vargas, F., Osorio, G., Mesa, J., Lizarazo, A. y Romero, G. (2017). estudio paralelo proyecto piloto. análisis de impacto normativo: ahorro en el uso de agua potable. <https://www.cra.gov.co/analisis-impacto-normativo-ahorro-uso-agua-potable-consumo-suntuario>. ↑Ver página 113, 115

Orjuela, L., Saldarriaga, G., García, M. y Wilches, H. (2010). Calidad de agua superficial en Colombia. En *Estudio nacional del agua* (pp. 230-280). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP6.pdf>. ↑Ver página 115, 116

Osorio, M., Sierra, J. E. y Gómez, L. F. (2011). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cali*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) - Fundación Pachamama. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/Cali/POMCHRioCali2011.pdf
↑Ver página

Pabón, S. L. y Suárez, J. (2009). Arranque y operación a escala real de un sistema de tratamiento de lodos activos para aguas residuales de matadero. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29(2), 53-58. <http://www.scielo.org.co/img/revistas/iei/v29n2/v29n2a08.pdf>. ↑Ver página 117

Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., & Roh, S. H. (2019, June 1). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*, 221, 598-621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172>. ↑Ver página 119

- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2). <https://doi.org/10.22507/pml.v10n2a13>. ↑Ver página 118, 119
- Pérez, J., Aguilera, M., Otero, A., Sánchez, A. y Acosta, K. (2014). *Economía de las grandes ciudades en Colombia: seis estudios de caso*. Banco de la República. https://books.google.com.co/books?id=yHrxBwAAQBAJ&dq=informe+crecimiento+poblacional+ciudades+Colombia&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s. ↑Ver página 115
- Rabaey, K., Angenent, L., Schroder, U. y Keller, J. (eds.). (2009). *Bioelectrochemical systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application*. IWA Publishing. https://books.google.com.co/books?id=2z_vfgvFAJ0C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. ↑Ver página 120, 121, 122, 123
- Red Española de Compostaje. (2014). *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica*. (Vol. 2). https://www.google.com.co/books/edition/Aspectos_biol%C3%B3gicos_de_la_digesti%C3%B3n_an/7b3-CAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Aspectos+biol%C3%B3gicos+de+la+digesti%C3%B3n+anaer%C3%B3bica&printsec=frontcover. ↑Ver página 118, 119
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H. y Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 17-28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>. ↑Ver página 123
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A. y Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149-164. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12>. ↑Ver página 113, 117
- Rodwell, V. W., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J. y Weil, A. P. (2016). *Harper. Bioquímica ilustrada*. McGraw-Hill Education. ↑Ver página 120, 121
- Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería. https://catalogo.escuelaing.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=12263&query_desc=kw%2Cwrdl%3A%20Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20teor%C3%ADa%20y%20principios%20de%20dise%C3%B1o ↑Ver página 113
- Romero Mejía, A. A., Vásquez, J. A. y Lugo González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, 16(32), 117. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10>. ↑Ver página 119, 120, 122

- Santana, M. del C., Bonilla Tovar, J. F. y Castillo Sotomayor, C. A. (2015). *Rango de consumo básico*. https://www.cra.gov.co/sites/default/files/marco-legal/2017-11/Documento_de_Trabajo_y_Participacion_Ciudadana_750.pdf. ↑Ver página 115
- Shi, L., Squier, T. C., Zachara, J. M. y Fredrickson, J. K. (2007). Respiration of metal (hydr)oxides by *Shewanella* and *Geobacter*: A key role for multiheme c-type cytochromes. *Molecular Microbiology*, 65(1). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2007.05783.x>. ↑Ver página 114, 120, 121, 122
- Singh, L. y Mahapatra, D. M. (2021). *Delivering low-carbon biofuels with bioproduct recovery*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2019-0-04257-4>. ↑Ver página 119, 121, 122, 123
- Sophonsiri, C. y Morgenroth, E. (2004). Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters. *Chemosphere*, 55(5), 691-703. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.11.032>. ↑Ver página 119
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2013). *Informe técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales*. https://issuu.com/luisespinoso7/docs/informe_t_cnico_sobre_sistemas_de. ↑Ver página 113, 118
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2016). *Evaluación integral de prestadores Empresas Públicas de Medellín E. S. P.* <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/2015evaluacionintegraldeprestadorempresaspublicasdemedelline.s.p.pdf> ↑Ver página
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aa_2018-20-12-2019.pdf. ↑Ver página 118
- Tejada Tovar, C. N., Villabona Ortiz, A. y Contreras Amaya, R. (2021). Electrocoagulation as an alternative for the removal of chromium (VI) in solution. *Tecnura*, 25(68), 28-42. <https://doi.org/10.14483/22487638.17088>. ↑Ver página 127
- Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA*, (18), 115–129. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372012000200010. ↑Ver página 113, 117
- Tortora, G. J., Funke, B. R. y Case, C. L. (2006). *Introducción a la microbiología*. (9.ª ed.). Médica Panamericana. ↑Ver página 126

- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2020). *World population prospects 2019*. (vol. 2). https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Volume-II-Demographic-Profiles.pdf. ↑Ver página 115
- Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M. y Núñez, D. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 28(2), 315-322. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-33052020000200315&script=sci_arttext&tlng=n. ↑Ver página 113, 114
- Velvizhi, G. y Venkata Mohan, S. (2011). Biocatalyst behavior under self-induced electrogenic microenvironment in comparison with anaerobic treatment: Evaluation with pharmaceutical wastewater for multi-pollutant removal. *Bioresource Technology*, 102(23), 10784-10793. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.061> ↑Ver página 127
- Velvizhi, G. y Venkata Mohan, S. (2015). Bioelectrogenic role of anoxic microbial anode in the treatment of chemical wastewater: Microbial dynamics with bioelectro-characterization. *Water Research*, 70, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.002>. ↑Ver página 119, 123, 124, 127
- Yeruva, D. K., Velvizhi, G. y Mohan, S. V. (2016). Coupling of aerobic/anoxic and bioelectrogenic processes for treatment of pharmaceutical wastewater associated with bioelectricity generation. *Renewable Energy*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.006>. ↑Ver página 125, 127
- Zhang, C., Li, M., Liu, G., Luo, H. y Zhang, R. (2009). Pyridine degradation in the microbial fuel cells. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 465-471. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.027>. ↑Ver página 125, 127

ANEXO 1

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de los afluentes de las principales plantas de tratamiento de aguas residuales.

Nombre de la PTAR	Ubicación	Año	m ³ /día (miles)	Población beneficiada (millones)	Caracterización fisicoquímica					
					pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
Aguas Claras EPM Medellín -Bello, Antioquia	Avenida 30-31, sector Navarra, municipio de Bello	2018	432	2,2	7,4	251	145	153	62,8	2,7
Cañaverralejo	Calle 73 N.º 2E-97, Cali, Valle del Cauca	Fase I: 2003 Fase II: 2019	492	2,536	7	490	238	152	17	NR
Salitre	Av. Calle 80 N.º 121-98 Bogotá, vía Lisboa, Suba, kilómetro 1,5	Fase I: 2000 Fase II: 2021	345	2,3	7,4	472	681	307	61,2	NR
San Fernando	Calle 85 B N.º 43-13, municipio de Itagüí	Fase I: 2000 Fase II: En construcción	311	3,04	7,9	39,2	181	30	3,9	0,4
Tuluá	Tres Esquinas, Tuluá, Valle del Cauca	Fase I = 2008 Fase II = 2015	10	0,221	7,4	NR	300	389	NR	NR
Canoas	Proyectado para construcción en el municipio de Soacha	2030	1555	7,32	7,8	NR	267	265	75,9	NR
Tejar	Ibagué (Tolima)	2001	97	0,111	NR	567	465	310	NR	NR

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018); Empresas Públicas de Medellín (2020); Gómez Vallejo et al. (2014); Llanos (2000); Osorio et al. (2011); Pérez et al. (2014); Rodwell et al. (2016); Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2016, 2019); Torres (2012); Corporación Autónoma del Valle del Cauca (2017); Empresas Municipales de Cali (2022); Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (s. f.); Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2020b); Empresas Públicas de Medellín (2020, s. f.); Aguas Mocoa S. A. E. S. P. (2021); Bustamante et al. (2014); Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (2014); IBAL (2017).

ANEXO 2

Tabla 4. Descripción operativa de las principales plantas de tratamiento de aguas residuales

Nombre de la PTAR	Tratamiento preliminar	Tratamiento primario	Tratamiento secundario
Aguas Claras EPM Medellín - Bello, Antioquia	<p>Cribado/Rejilla de protección: retención de sólidos muy grandes.</p> <p>Cribado/Rejilla de gruesos: retención de residuos ordinarios.</p> <p>Cribado/Rejilla de finos: retención de sólidos ordinarios de menor tamaño.</p>	<p>Tanque desarenador: retención de grasas y arenas.</p> <p>Tanque sedimentador primario: precipitación de contaminantes por medio de coagulantes.</p>	<p>Tanque de aireación: remoción de carga contaminante por medio de lodos activados/digestión aerobia.</p> <p>Tanque sedimentador secundario: separación física de los lodos generados en el tanque de aireación.</p> <p>Tanque espesador de lodos: tratamiento de los lodos generados en el tanque de aireación.</p>
Cañaveralejo	<p>Cribado/Rejilla de gruesos: remueve basuras gruesas del AR. Cada rejilla tiene una separación de 10 cm.</p> <p>Tolva: almacenamiento de las basuras recolectadas para su disposición final.</p>	<p>Desarenador: remoción de grasas, aceites y arenas.</p> <p>Sedimentador: remoción de carga contaminante usando cloruro férrico en concentraciones de 28-47%, hidróxido de aluminio y polímeros para facilitar la coagulación.</p> <p>Desinfección: uso de carbón activado y cloro gaseoso.</p>	No aplica
Salitre	<p>Cribado/ Rejilla de gruesos: barrotos con 5 cm de separación.</p> <p>Cribado/Rejilla de gruesos: barrotos con 1,5 cm de separación.</p>	<p>Desarenador: canal de 4×30×4,5 m donde se retienen las grasas y arenas, utilizando un caudal de 7,9 min.</p> <p>Coagulación/Floculación: se adiciona 22 g/m³ de cloruro Ferrico y 0,36 g/m³ de polielectrolito anónico como floculante.</p> <p>Tanque sedimentador primario: 8 tanques de 43 m de diámetro y 4 m de altura, que permite la precipitación de lodos.</p>	No aplica

San Fernando	Cribado rejillas: remoción de sólidos por medio de rejillas y tamices.	Tanque desarenador: retención de grasas y arenas. Tanque sedimentador primario: precipitación de contaminantes por medio de coagulantes.	Tanque de aireación: remoción de carga contaminante por medio de lodos activados/digestión aerobia. Tanque sedimentador secundario: separación física de los lodos generados en el tanque de aireación. Digestión anaerobia: tratamiento de lodos generados.
Tuluá	Cribado/rejilla de gruesos: remoción de sólidos grandes. Cribado/Rejilla de finos: remoción de sólidos ordinarios de menor tamaño.	Filtro percolador: remoción biológica de carga contaminante, por medio de una película de microorganismos aerobios que se encuentran en el filtro. Clarificador: sedimentador de 1,186 m ² utilizado para disminuir la turbidez del agua residual.	No aplica
Canoas	Proyecto en fase de Ingeniería Básica (predimensiones de la PTAR bajo contrato 1-02-26100-806-2006)		
Tejar	Cribado/Rejilla de protección: retención de sólidos usando barros de 10 cm. Cribado/Rejilla de gruesos: retención de sólidos usando barros de 4 cm. Cribado/Rejilla de finos: retención de sólidos usando barros de 1 cm.	Reactor de flujo ascendente anaerobio: reactor alimentado por una laguna de estabilización previa, donde se encuentran lodos anaerobios. Sedimentador: se separa el AR de la materia orgánica removida en UASB.	No aplica

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018); Empresas Públicas de Medellín (2020); Gómez Vallejo et al. (2014); Llanos (2000); Osorio et al. (2011); Pérez et al. (2014); Rodwell et al. (2016); Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2016, 2019); Torres (2012); (Corporación Autónoma del Valle del Cauca, 2017; Empresas Municipales de Cali, 2022); Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (s. f.); Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2020b); Empresas Públicas de Medellín (2020, s. f.); Aguas Mocoa S. A. E. S. P. (2021); Bustamante et al. (2014); Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (2014); IBAL (2017).

ANEXO 3

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de los efluentes de las principales plantas de tratamiento de aguas residuales.

Nombre de la PTAR	Caracterización fisicoquímica					
	pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
Aguas Claras EPM Medellín-Bello, Antioquia	7,4	77	47	27	55,6	5
Cañaverelejo	6,5	226	126	49	NR	NR
Salitre	7,04	154	203	123	NR	NR
San Fernando	NR	132	42	31	NR	NR
Tuluá	NR	NR	60	77	NR	NR
Canoas	NR	NR	134	79	NR	NR
Tejar	NR	83	60	12	NR	NR

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018); Empresas Públicas de Medellín (2020); Gómez Vallejo et al. (2014); Llanos (2000); Osorio et al. (2011); Pérez et al. (2014); Rodwell et al. (2016); Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2016, 2019).; Torres (2012); Corporación Autónoma del Valle del Cauca (2017); Empresas Municipales de Cali (2022); Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (s. f.); Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2020b); Empresas Públicas de Medellín (2020, s. f.); Aguas Mocoa S. A. E. S. P. (2021); Bustamante et al. (2014); Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (2014); IBAL (2017).



CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del

Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Copernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista Tecnura tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas

(Publindex-Colciencias), la revista Tecnura recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

Artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

Artículo de revisión: documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

FORMATO DEL ARTÍCULO

Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse bre-

vemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.

- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.
- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábiga hasta el tercer nivel únicamente.

De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió

dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes, considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades,

dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista *Tecnura* es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía de Microsoft Word* (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en . . .
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha. La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) . . .
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un “et al”. En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que . . .
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el “et al”.

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Publicaciones Periódicas:

Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. Título de la publicación, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12-23. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHz. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Libros:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Apellidos, A. A. (Año). Título. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>

Apellidos, A. A. (Año). Título. doi: xx.xxxxxxxx

Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Libro con editor

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Libro versión electrónica:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Informe técnico

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40)*. San Juan: International Institute

of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System

en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.
- Exclusividad de su remisión a la revista Tecnura.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista Tecnura: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista Tecnura para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.

4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista Tecnura.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista *Tecnura*
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Celular: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Página web:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CONTENT

- Scope and editorial policy of the journal
- Type of accepted articles
- Article format
- Article submission
- Publication procedure
- Article arbitration
- Contact

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. Tecnura Journal has as mission to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online

Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), Tecnura journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- **Scientific and technological research articles:** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- **Reflection articles:** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- **Review article:** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.
- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.

- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in Times New Roman letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used.

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by Tecnura journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en
- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)
- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.". En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que . . .
- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al."

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by Tecnura journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. Title of the publication, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. Revista Tecnura, 18(42), 12-23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. Revista Tecnura, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). Title. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). Title. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). Title. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). Title. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas.

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). Psychology of Liberation: Theory and applications. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Technical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis

Basic form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents

Basic form

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.

- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.

10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

ARTICLE ARBITARION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to

a university or industry, public or private; their complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal.

The Editorial Committee of Tecnura journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of Tecnura Journal, to the following address:

Tecnura Journal

Journals Room, Block 5, Office 305.

Faculty of Technology

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Phone: 571-3239300 Extension: 5003

Mobile: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Web page:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>